

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA**

**EDUARDO LUÍS FESTA**

**APLICAÇÃO DA META HEURÍSTICA VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH NA  
OTIMIZAÇÃO DE ESCALAS DE MOTORISTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO  
URBANO**

Joinville

2016

EDUARDO LUÍS FESTA

**APLICAÇÃO DA META HEURÍSTICA VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH NA  
OTIMIZAÇÃO DE ESCALAS DE MOTORISTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO  
URBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística no Curso de Engenharia de Transportes e Logística da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientadora: Profa. Dra. Silvia Lopes de Sena Taglialenha

Joinville

2016

**APLICAÇÃO DA META HEURÍSTICA VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH NA  
OTIMIZAÇÃO DE ESCALAS DE MOTORISTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO  
URBANO**

**EDUARDO LUÍS FESTA**

Esta monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville.

Joinville, 08 de Julho de 2016.

Banca examinadora:

---

Professora Dra. Silvia Lopes de Sena Taglialenha  
Orientadora

---

Professora Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes  
Membro 1

---

Professora Dra. Vanina Macowski Durski Silva  
Membro 2

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que não mediram esforços para que este momento ocorresse, me incentivando a persistir nos momentos mais difíceis no início da graduação, acreditando no meu potencial e oferecendo todo suporte que havia à sua altura.

A todos os professores e servidores que contribuíram imensamente com meu desenvolvimento técnico e intelectual, repassando conhecimento suficiente para me formar engenheiro. Em especial a minha orientadora Silvia Lopes de Sena Taglialenha, que mesmo com inúmeras responsabilidades na sua vida, se dispôs a me orientar e oferecer muita paciência e confiança, me tranquilizando nos momentos de incerteza e ansiedade.

À banca avaliadora, composta pelas professoras Christiane Wenck Nogueira Fernandes e Vanina Macowski Durski Silva, por terem aceitado o convite de me avaliar. E claro, à Luciana Reginato Dias, uma profissional incrível e das poucas unanimidades do Centro, que apesar de todas as adversidades encontradas no campus, nunca poupou esforços para me ajudar todo início de semestre.

Aos amigos que formei ao longo da graduação, credito boa parte dos méritos dessa conquista a eles. Dos melhores aos piores momentos, foi com eles que vivi. Inúmeras festas, noites viradas de estudos e trabalhos, parceria que durava 24 horas por dia e 7 dias na semana, não tenho dúvidas que anos se passarão e recordarei desses momentos com enorme saudade. Principalmente à toda família denominada Rapeize, onde formei elos para o resto da vida. Sem ordem de prioridade, em especial a Mayckon Moura, grande irmão que me acompanha há mais de 6 anos nessa caminhada. Juan Carlos Matos, um irmão que ganhei ao longo da graduação que serviu de grande conselheiro em inúmeros momentos, sendo a pessoa que mais me fez rir me alegrando nos piores momentos. Willian Becker Lopes, um irmão que considero uma segunda versão minha na Terra. Alexandre Massaneiro Luciano, irmão e fiel parceiro acadêmico. Aos amigos que compartilhei moradia, onde tive a oportunidade de aprender a valorizar muito mais a amizade, em especial ao Teko, Shimizu, Marcelo, Fábio, Daniel e Muca. Dentro das mais incríveis pessoas que conheci, devo mencionar também Hector, Japa e Ique, que compartilharam, junto com os demais, extremo bom humor e carisma. Aos amigos das matérias específicas, no qual houve união suficiente para avançarmos as etapas juntos.

Ao pessoal do estágio, onde tive o maior prazer de integrar uma equipe de pessoas incríveis, que colaboraram imensamente com meu crescimento pessoal e profissional.

À empresa que colaborou me disponibilizando os dados. Obrigado por acreditarem, sem essa ajuda o trabalho não teria sido concluído.

## RESUMO

O presente trabalho aborda o Problema de Programação de Tripulação de ônibus urbano (PPT) o qual consiste em determinar jornadas diárias de trabalho para tripulantes que conduzirão uma frota em operação com o menor custo possível e atendendo restrições operacionais e trabalhistas. O PPT é uma etapa muito importante no planejamento operacional do Sistema de Transporte Público visto que o custo operacional representado pelas escalas de trabalho compõe uma parcela significativa nos custos totais de uma empresa do ramo. A redução dos custos das escalas de trabalho afeta não só as empresas operadoras, mas também os usuários deste serviço, pois com esta redução há a possibilidade de um maior investimento na qualidade do transporte público e a redução dos preços dos bilhetes. Estes custos estão estritamente relacionados às normas operacionais impostas pelas empresas e legislações trabalhistas. Quando se considera uma abordagem de solução exata que utiliza o modelo matemático de programação linear inteira o qual é considerado de alta complexidade, o PPT não pode ser resolvido em tempo computacional viável quando se trata de problemas de médio e grande porte. Assim, devido à complexidade computacional para se obter uma solução utilizando métodos exatos, neste trabalho considera-se um método pertencente a uma classe alternativa de métodos de solução, denominada meta heurística, mais especificamente, a busca em vizinhança variável (Variable Neighborhood Search – VNS), que para evitar ótimos locais realiza trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança no espaço de busca. A implementação proposta é testada com os dados reais de uma empresa de médio porte e os resultados são comparados com o cenário atual da empresa.

**Palavras-chave:** Problema de Programação de Tripulação. Meta heurística. Variable Neighborhood Search.

## ABSTRACT

The following work present the Crew Scheduling Problem (CSP) of urban buses that consist in determine the daily work schedules for the crew, that will be responsible to lead an operation fleet in the most economical way and meeting all the operational restrictions. The CSP is a very important step in the operational planning of the Public Transport System as the operating cost represented by crew schedules make up a significant portion of the total costs of a company in the sector. The reduction costs of work schedules affect not only the operating companies, but also the users of this service, because with this reduction there is the possibility of greater investment in the quality of public transport and the reduction of ticket prices. These costs are strictly related to the operational standards required by companies and labor legislation. When considering an exact solution approach that uses mathematical model of integer linear programming which is considered high complexity, the CSP can not be solved in a viable computational time when it is related to medium or larger problems. Due to that computational complexity, to be able to obtain a solution utilizing exact methods, in this work it is considered the utilization of the belonged method into an alternated class of solution methods named as metaheuristic, more specifically, Variable Neighborhood Search (VNS), that to avoid from local optimal, realize a systematic changes on the neighborhood structures inside the research space. The solution proposal presented is tested with real data, that was taken from a medium sized company and the results are compared to the current situation of the company.

**Key words:** Crew Scheduling Problem. Metaheuristic. Variable Neighborhood Search.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Algoritmos de otimização .....	18
Figura 2: Procedimento VNS .....	26
Figura 3: Funcionamento do VNS.....	28
Figura 4: Modos de transporte e suas ramificações.....	32
Figura 5: Inter-relação entre os tipos de planejamento.....	39
Figura 6: Fluxograma das atividades de elaboração do plano de transporte.....	41
Figura 7: Composição tarifária .....	53
Figura 8: Projeto Escala.....	57
Figura 9: Projeto Veículo .....	58
Figura 10: Representação de uma escala .....	60
Figura 11: Operação de troca.....	60
Figura 12: Operação de realocação .....	61
Figura 13: Troca e relocação entre tarefas.....	62
Figura 14: Rotina RN1 .....	63
Figura 15: Rotina RN2 .....	64
Figura 16: Rotina RN3 .....	65
Figura 17: Solução inicial - Projeto 0650-4.....	66
Figura 18: Solução obtida - Projeto 0650-4 .....	67

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Indicadores de confiabilidade dos serviços de transporte público (%) .....	44
Tabela 2: Indicadores de tempo de deslocamento dos serviços de transporte público.....	45
Tabela 3: Indicadores de acessibilidade locacional dos serviços de transporte público .....	46



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	14
2.1 PESQUISA OPERACIONAL	14
2.2 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULAÇÕES - PPT	15
2.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO	18
2.3.1 Métodos Exatos	19
2.3.2 Métodos Heurísticos e Meta heurísticos	22
2.3.2.1 Variable Neighborhood Search – VNS	25
2.3.3 Métodos Híbridos	29
2.4 PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES	30
2.5 TRANSPORTE PÚBLICO	42
2.5.1 Sistema de Transporte Público de Passageiros	43
2.5.1.1 O Usuário	44
2.5.1.2 O Operador	48
2.5.1.3 O Poder Público	50
2.6 TARIFA	51
<b>3. ESTUDO DE CASO E MÉTODO PROPOSTO</b>	55
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	55
3.1.1 Coleta e Tratamento de Dados	56
3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	58

<b>3.2.1 Função Objetivo.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.2 Premissas Consideradas.....</b>	<b>59</b>
3.3 SOLUÇÃO INICIAL E REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO .....	59
3.4 DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE VIZINHANÇA .....	60
<b>3.4.1 Vizinhança N1 .....</b>	<b>60</b>
<b>3.4.2 Vizinhança N2 .....</b>	<b>61</b>
<b>3.4.3 Vizinhança N3 .....</b>	<b>61</b>
3.5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	62
3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	65
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>69</b>
4.1 DIFICULDADES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em muitas cidades o ônibus é o principal, senão o único meio de transporte público de passageiros, portanto, é necessário que as empresas do ramo tenham suas atividades muito bem planejadas para atender à demanda dos usuários do sistema de maneira econômica. Para tanto, devem ser utilizadas ferramentas computacionais que auxiliem o processo de decisão. Nesse contexto é que se inserem os métodos de otimização, os quais podem levar à redução dos custos. Entre os custos de maiores pesos se destacam os operacionais, com os veículos, motoristas e cobradores (BOUZADA, 2003).

Segundo Silva e Reis (2014), o planejamento de um sistema de transporte público é decomposto em quatro etapas a fim de tornar o problema tratável do ponto de vista computacional.

A etapa inicial é constituída pela elaboração das rotas e dos quadros de horários, de maneira que todas as regiões da cidade sejam atendidas e que o tempo de espera nos pontos e terminais atenda a um dado nível de qualidade estipulado no processo licitatório.

A segunda etapa trata do problema da alocação de veículos que realizarão as viagens das tabelas de horários. Nessa etapa, é determinada a quantidade necessária de veículos para atender as viagens de cada rota, assim como especificar as viagens a serem realizadas por cada veículo durante a operação.

A terceira etapa compreende o problema da alocação das tripulações, composta pelo motorista e o cobrador, tomando como base as viagens alocadas a cada veículo da frota em operação. Nessa etapa, deve ser determinada a quantidade necessária de tripulantes para conduzir os veículos e quais as viagens que cada tripulação realizará. Dessa maneira são definidas as jornadas diárias de trabalho que deverão ser executadas pelas tripulações da empresa.

A etapa final do planejamento da operação do sistema diz respeito ao problema do rodízio das tripulações. Nesta etapa são geradas as escalas mensais das tripulações com o

menor custo possível de maneira a cobrir todas as jornadas diárias, respeitando as regras trabalhistas para o período. Essas etapas geralmente são realizadas na ordem que foram expostas e a solução do problema de uma etapa é usada como entrada da etapa subsequente.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A terceira etapa mencionada anteriormente, conhecida na literatura especializada como, Problema da Programação de Tripulações (PPT) (crew scheduling problem) será considerada neste trabalho. O PPT consiste em determinar o número mínimo de tripulantes e especificar suas viagens de tal forma a cobrir todas as viagens da frota em operação com o menor custo possível (SILVA; REIS, 2014). Nessa etapa são definidas as jornadas de cada tripulante, portanto, um tripulante está associado a uma jornada diária de trabalho e vice-versa.

Para definir as jornadas diárias, devem ser respeitadas todas as leis trabalhistas e regras operacionais impostas pela empresa. Entre essas, destacam-se a carga horária máxima de trabalho, o tempo de descanso entre as jornadas, o número máximo de tripulações que podem trabalhar em um determinado tipo de jornada, entre outras.

As jornadas podem ser de dois tipos:

- pegada simples, quando o tempo entre as viagens é inferior a duas horas, e;
- dupla pegada, que são jornadas que apresentam um intervalo maior do que duas horas entre duas viagens.

Essas jornadas existem para atender as demandas mais acentuadas que ocorrem especificamente nos horários de pico. Durante uma jornada de trabalho, os tripulantes podem realizar uma troca de veículos, que pode ser uma forma de reduzir o tempo ocioso das tripulações. A empresa restringe o número de trocas realizadas pelas tripulações normalmente para facilitar o controle sobre o desgaste dos veículos em operação. Uma jornada deve ser definida de tal forma que o tempo de descanso entre o seu final e seu início no dia seguinte seja maior ou igual ao tempo mínimo de descanso estipulado pela legislação. Dessa forma, uma mesma tripulação pode realizá-la em dias consecutivos sem infringir a regra do descanso em casa.

Devido às restrições impostas, o problema é classificado como um problema NP-Difícil, ou seja, não existem algoritmos que obtenham as soluções ótimas em tempo

polinomial da entrada de dados (HILLIER, 2013). Portanto, é necessária a utilização de métodos heurísticos para resolver de forma satisfatória problemas de grande porte.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Propor um método heurístico para resolver o problema de programação de escalas de motoristas de ônibus urbano para determinar o número mínimo de tripulantes e especificar as suas viagens de tal forma a cobrir todas as viagens da frota em operação com o menor custo possível.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer um estudo sobre os principais agentes e legislações relacionados ao PPT;
- Desenvolver um modelo matemático para o PPT utilizando o método VNS;
- Desenvolver uma representação e codificação de uma proposta de solução para facilitar a implementação do método proposto;
- Realizar um estudo de caso com uma empresa de transporte público da região norte do Estado de Santa Catarina a fim de levantar os dados necessários;
- Comparar a solução obtida com a aplicação do método proposto com o cenário real praticado pela empresa.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em quatro capítulos. O primeiro se refere à introdução, onde são apontados a motivação e os objetivos do trabalho.

O segundo diz respeito ao referencial teórico, no qual foi feito um levantamento de temas semelhantes na literatura e aspectos relevantes sobre o transporte público.

O terceiro trata da contextualização do caso e do método proposto. Por fim, no quinto encontram-se as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo apresenta os conceitos relacionados ao trabalho desenvolvido, tais como o PPT, meta heurísticas e trabalhos relacionados.

### **2.1 PESQUISA OPERACIONAL**

A expressão Pesquisa Operacional (PO) designa um ramo do conhecimento que consiste no desenvolvimento de métodos científicos de sistemas complexos, com a finalidade de prever e comparar estratégias ou decisões alternativas, cujo objetivo é dar suporte à definição de políticas e determinação de ações (CARDOSO, 2011).

Contudo, outras definições de Pesquisa Operacional podem ser encontradas na literatura. Utiliza-se um conjunto de técnicas quantitativas com o intuito de resolver os aspectos matemáticos dos modelos. Para Ehrlich (1982), a PO é uma metodologia para estruturar processos aparentemente não estruturados por meio da criação de modelos. Já para Sacomano et al. (2004) é a aplicação do método científico, por equipes interdisciplinares a problemas que dizem respeito ao controle de sistemas organizados, com o propósito de obter-se as soluções que melhor satisfaçam aos objetivos da organização, como um todo.

De forma geral, a origem da PO é bem conhecida. Durante a Segunda Guerra Mundial, um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar problemas de estratégia e de tática associados com a defesa do país. O objetivo era decidir sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados. A convocação deste grupo marcou a primeira atividade formal de pesquisa operacional. Desenvolveram então a ideia de criar modelos matemáticos, apoiados em dados e fatos, que lhes permitissem perceber os problemas em estudo, simular e avaliar o resultado hipotético de estratégias, bem como propor decisões

alternativas. Em 1941 a Inglaterra inaugura a Seção de Pesquisa Operacional do Comando da Força Aérea de Combate para trabalhar com problemas de operações de guerra, manutenção e inspeção de aviões, melhoria da probabilidade de destruição de submarinos, controle de artilharia antiaérea, dimensionamento de comboios de frota, entre outros (CARDOSO, 2011).

Os resultados positivos conseguidos pela equipe de pesquisa operacional inglesa motivaram os Estados Unidos a iniciarem atividades semelhantes. Apesar de ser creditada à Inglaterra a origem da Pesquisa Operacional, sua propagação deve-se principalmente à equipe de cientistas liderada por George B. Dantzig, dos Estados Unidos, convocada durante a Segunda Guerra Mundial.

Face ao seu caráter multidisciplinar, atualmente as contribuições da PO estendem-se por praticamente todos os domínios da atividade humana. Os ramos mais importantes desenvolvidos em PO são: Programação Matemática, Programação Linear, Análise Estatística, Programação Não Linear, Teoria dos Jogos, Programação Dinâmica, Teoria das Filas, Programação Inteira, Simulação, Otimização Global e Gestão de estoques.

Segundo Gouveia (2005), nesse sentido a PO é utilizada com ferramenta para estudar operações envolvidas nas atividades empresariais, com objetivo de oferecer aos gestores resultados quantitativos que auxiliem na tomada de decisões a partir da criação de modelos que permitem a simulação e avaliação de alternativas de ação que possam ser implantadas de modo a alcançar vantagens competitivas.

Resumidamente, pode-se dizer que o objetivo principal da PO é determinar a programação otimizada de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistematizada problemas que envolvam a utilização de recursos escassos. Para apoiar a tomada de decisão, a PO busca a solução de problemas que podem ser representados por modelos matemáticos (CARDOSO, 2011).

## 2.2 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULAÇÕES - PPT

O principal objetivo do Problema de Programação de Tripulações (PPT) é atribuir o conjunto de tarefas requeridas aos tripulantes para operação dos veículos responsáveis pelo transporte público, respeitando as regulamentações trabalhistas, acordos sindicais, regras de segurança e políticas das empresas, de tal forma que a minimização do custo total da tripulação seja combinada com a satisfação dos tripulantes e dos usuários.

Vários métodos de resolução do PPT são demonstrados na literatura por diferentes autores, com resultados comprovadamente satisfatórios em relação à redução de custos operacionais quando métodos heurísticos são aplicados em casos reais (SILVA; GUALDA, 2001; SILVA, 2001; SILVA; GUALDA, 2000; WREN; GUALDA, 1999; SMITH; WREN, 1981). As abordagens mais utilizadas para tratar com este modelo são problemas de conjunto de cobertura ou de particionamento.

A estratégia de geração de colunas é em grande parte utilizada para resolver o problema, como pode ser visto nas obras de Fores et al. (1999), Barnhart (1998), Desrochers e Soumis (1989), Smith e Wren (1988), bem como as técnicas Branch-and-Bound (FORES et al., 1999; SMITH; WREN, 1988), o Branch-and-Cut (FRIBERG; HAASE, 1999) e o Branch-and-Price (BARNHART et al., 1998; DESROCHERS; SOUMIS, 1989). No entanto, modelos exatos são limitados em aplicações práticas, uma vez que são incapazes de resolver problemas muito grandes. Assim, é necessário utilizar métodos heurísticos para resolver problemas que aparecem na vida real, que são amplos e demandam alto custo computacional, obtendo-se resultados muito interessantes, embora a otimalidade das soluções não seja garantida.

Um dos grupos pioneiros nesta área, chamado de Scheduling and Constraint Management Group of Leeds University, realizou um conjunto de implementações heurísticas usando Algoritmos Genéticos (LI; KWAN, 2003) e Busca Tabu (SHEN; KWEN, 2001). Os modelos desenvolvidos por este grupo são extremamente utilizados no Reino Unido para alocar escalas de tripulação, bem como a programação operacional da frota (WREN, 2004).

Embora o PPT tenha sido amplamente estudado e aplicado em mais países na Europa e na América do Norte, as suas técnicas de resolução são pouco divulgadas. Parcialmente, isso acontece porque as empresas não possuem os dados necessários de entrada, e também porque faltam modelos e sistemas comerciais que representem a realidade operacional brasileira.

Entre os estudos sobre o PPT aplicados na realidade brasileira, podemos destacar modelos meta heurísticos que usam Simulated Annealing, Busca Tabu, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) e Variable Neighborhood Search (VNS) (REIS; SILVA, 2012; SOUZA et al., 2004). Esses modelos têm sido testados com dados de empresas que operam no sistema de transporte público do Brasil e os resultados mostram que há grandes possibilidades de reduzir custos em relação às soluções adotadas pelas empresas.

A técnica de busca local denominada Very Large-scale Neighborhood Search (VLNS) (AHUJA, 2000) foi utilizada pela primeira vez para resolver o PPT por Silva e Cunha (2010), entretanto, foi observado pelos autores supracitados que o desempenho da pesquisa VLNS é fortemente dependente da solução inicial, desta maneira, são propostas às



obras futuras a adoção de meta heurísticas baseadas em uma solução única que fazem perturbações periódicas na solução atual através de diferentes movimentos.

Nesta classe de meta heurísticas, a VNS (MLADENOVIC; HANSEN, 1997) e Iterated Local Search (ILS) (LOURENÇO et al., 2001) podem ser apontadas. A primeira consiste em explorar o espaço de soluções através de mudanças sistemáticas, enquanto que a ideia principal da ILS é, iterativamente, perturbar o ótimo local obtido e aplicar a busca local para essa solução. A VNS já foi implementada fazendo uso do VLNS para resolver o PPT, onde os detalhes e resultados podem ser encontrados na obra de Reis e Silva (2011).

Outros modos de transportes apresentam problemas relacionados à alocação de funcionários, como consta na obra de Ernst et al. (2004), onde é mencionado que a complexidade dos problemas depende do tipo de transporte, da categoria da tripulação, dos tipos de frota, das regras e regulamentações, da regularidade das viagens e dos custos a serem considerados. Ainda segundo o autor, uma das abordagens mais utilizadas para resolver o PPT decompõe-se nas seguintes etapas: geração das jornadas, otimização das jornadas e definição do rodízio da tripulação. Assim, a complexidade do problema é reduzida, viabilizando de uma melhor forma a sua solução.

Moura (2000) utiliza programação inteira e geração de colunas para solucionar o PPT formulado como um problema de particionamento. Ball et al. (1981) propõe um método o qual consiste em uma solução iterativa que resolve o problema combinado em pequenas partes de trabalho em partes maiores, criando, então, as jornadas de trabalho. Em vários trechos do algoritmo, o usuário pode retirar combinações infactíveis ou fazer ajustes manuais.

Fischetti et al. (2001) consideram um caso interessante, onde o problema é modelado com programação inteira e não como um problema de recobrimento. A modelagem inteira resultante tem uma relaxação linear muito livre, mas pode ser apertada por meio de novos cortes, baseada em um algoritmo branch-and-cut. Testes numéricos mostram como o método é competitivo em alguns tipos de problemas.

Baseado no problema de cobertura de conjuntos, Yunes et al. (2005) teve como objetivo minimizar o número de motoristas utilizando duas instâncias reais, as quais eram constituídas por duas linhas, uma com 125 e outra com 246 viagens, que passam pela região metropolitana de Belo Horizonte (MG).

Segundo Azevedo et al. (1994), a divisão da escala de veículos em uma série de jornadas deve satisfazer, pelo menos, as seguintes restrições:

- jornadas que cubram todo o período de operação para todos os ônibus, exceto quando os veículos possam permanecer estacionados (sem tripulação);

- satisfazer a legislação trabalhista e os acordos entre as empresas operadoras e os sindicatos de motoristas e cobradores;
- minimizar o custo com o pagamento das tripulações, mantendo abaixo de um determinado limite, o número de características indesejáveis.

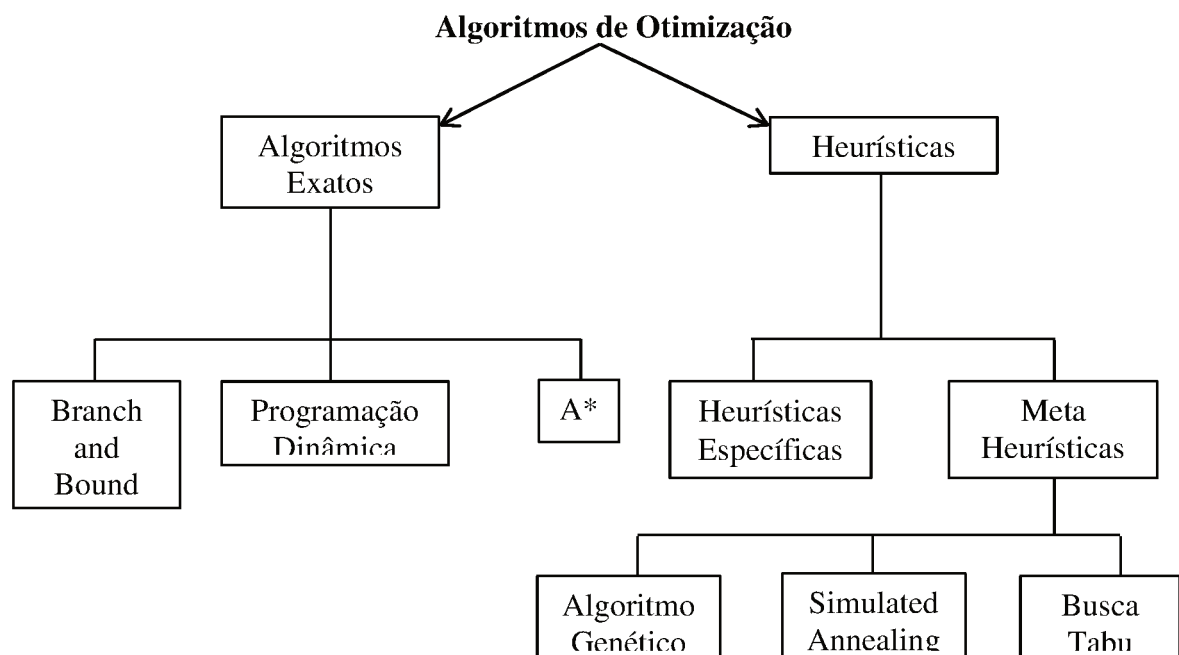
Para Cunha (1992), o dimensionamento e alocação de tripulações são decompostos em dois problemas distintos: o da definição das jornadas de trabalho e o de revezamento de pessoal. Os autores analisam apenas o problema do estabelecimento das jornadas de trabalho. Portanto, a programação da tripulação consiste na elaboração de um conjunto de turnos que juntos cubram a programação de veículos, e para alocar a tripulação a estes veículos devem ser atendidas as seguintes determinações:

- ter um motorista alocado para cada veículo no tempo que o veículo estiver em uso;
- designar os turnos de acordo com as leis trabalhistas. Por isso, deve ser levado em consideração: tempo máximo entre início e fim do turno; tempo máximo trabalhado (tempo dirigindo o veículo); tempo máximo antes do lanche; e, intervalo máximo do lanche;
- minimizar o número de turnos;
- minimizar o custo total.

## 2.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Os métodos de otimização de problemas são classificados como na figura 1.

Figura 1: Algoritmos de otimização



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 2.3.1 Métodos Exatos

Os métodos exatos se mostram mais eficientes quando utilizados para resolução de problemas de otimização combinatória quando os problemas são de pequena dimensão ou não são NP-Completo. No entanto, esses métodos podem ser ineficientes para problemas NP-Completo de grande dimensão, uma vez que o tempo de execução aumenta exponencialmente a medida que as instâncias aumentam. Ainda assim, existem várias abordagens exatas descritas na literatura para resolver o PPT. Entre elas pode-se citar a Programação Dinâmica, a Programação Linear e Inteira, Relaxação Lagrangeana, Programação por Restrições, entre outros. Muitas destas técnicas são flexíveis e independentes de domínio, e podem ser aplicadas a maioria dos problemas práticos (Stefanello, 2011).

Em Desrochers e Soumis (1989) é proposta uma abordagem de geração de colunas para resolver o Problema de Programação da Tripulação. Nessa abordagem, o problema é dividido em dois: um problema de cobertura de conjunto e um problema de caminho mínimo com limitação de recurso. O problema de cobertura de conjuntos escolhe uma escala de trabalho viável já conhecida. O problema de caminho mínimo é usado para propor novas escalas de trabalho para melhorar a solução obtida pelo problema de cobertura de conjuntos. Para o problema de cobertura de conjuntos, o método de geração de colunas é representado por linhas e colunas, onde as colunas representam uma escala viável e as linhas as tarefas a serem realizadas. O modelo deve selecionar as melhores escalas de modo que todas as tarefas de um dia de trabalho sejam cobertas. Porém as novas escalas são geradas usando um algoritmo de caminho mínimo com restrição de recursos. Cada caminho viável, da origem ao consumidor, representa uma jornada de trabalho viável, ou seja, uma nova coluna para o problema de cobertura de conjuntos. O método proposto apresenta resultados satisfatórios para resolver problemas considerados pequenos, compostos de 167 e 235 tarefas. No caso tratado neste trabalho, tem-se 478 tarefas.

Fores et al. (1999) apresentam um sistema baseado em programação linear inteira, como melhoria do sistema TRACS II desenvolvido pela Universidade de Leeds, Inglaterra. Diferente da abordagem utilizada no TRACS II, que utilizava duas funções objetivos para calcular as penalidades impostas na solução, o modelo proposto por Fores et al. (1999) utiliza uma função objetivo composta, e o método de geração de colunas para obter a sua solução

final. Os testes computacionais mostram que o modelo proposto consegue resultados melhores do que o modelo utilizado pelo sistema TRACS II, e obteve uma redução média de 41% no tempo de processamento para o mesmo conjunto de dados.

A abordagem branch-and-price foi utilizada por Freling et al. (2004) para resolver tanto o problema de alocação quando o problema do rodízio de tripulação. Para resolver o problema, os autores utilizaram uma abordagem do tipo Geração de Colunas onde inicialmente é escolhido um conjunto de jornadas (colunas) e então é resolvido o problema relaxando a condição de integralidade da solução. Em seguida, são geradas novas colunas que podem ser inseridas no conjunto, substituindo outra, caso esta inserção consiga reduzir o custo da solução. Esta operação se repete até que nenhuma jornada que reduza o custo seja encontrada. Se na etapa de geração de novas colunas não for encontrada nenhuma jornada que reduza o custo, a operação branch-and-bound é realizada. No início, uma solução (nó) é gerada para realizar o branch, calculando novos limites inferiores das duas soluções: a primeira gerada na resolução do problema com conjunto de jornadas e a outra após o processo de geração de colunas. Logo após, verifica-se se o novo custo é menor do que o melhor custo. Então o método verifica se todas as restrições estão sendo atendidas e o processo de branch-and-bound é iniciado novamente até que a condição de parada seja atendida. Os testes foram realizados em problemas de alocação de tripulações de aeronaves para instâncias pequenas. O modelo teve como objetivo minimizar o número de tarefas descobertas e o número de tripulantes.

Santos et al. (2007) utilizam uma abordagem exata de Geração de Colunas combinada com a meta heurística populacional Algoritmos Genéticos para resolver o PPT. Na geração de colunas, o problema é subdividido em dois: problema mestre e subproblema. O problema mestre seleciona as jornadas que serão realizadas pela tripulação em um conjunto de jornadas viáveis, de modo a conseguir cobrir todas as viagens necessárias. Já o subproblema é responsável por gerar novas jornadas (colunas). Estas jornadas são adicionadas ao problema mestre se possibilitarem a melhoria da solução. Para a resolução do subproblema é utilizado um Algoritmo Genético. Os resultados obtidos mostram que a utilização do Algoritmo Genético, em comparação com outras meta heurísticas, destaca-se pelo fato da possibilidade de geração de um conjunto maior de jornadas viáveis para a inclusão no problema mestre e consequentemente possibilita reduzir o tempo de processamento quando lida com grandes instâncias.

Conforme Siqueira (1999) existe um método de elaboração de escalas de trabalho de motoristas e cobradores de ônibus conhecido na literatura como método HASTUS. Neste

método, três fases são utilizadas para a construção das escalas. Inicialmente, uma escala aproximada é construída usando-se um processo de Programação Linear, relaxando as restrições de integralidade e de factibilidade objetivando a minimização do tempo computacional. Essas restrições referem-se às possibilidades de formação e combinação de escalas, máxima duração de uma parte de escala e sobre os locais de possíveis trocas de funcionários. Desse modo, obtêm-se as primeiras escalas, que são denominadas “pedaços” de trabalho. O conjunto formado por estas escalas é denominado escala aproximada.

Num segundo momento, as jornadas são divididas novamente, em partes semelhantes às primeiras escalas geradas, visando melhorar a escala aproximada. Essas melhorias são possíveis reduzindo-se a quantidade de horas-extras e o número de motoristas das primeiras divisões.

A próxima fase consiste na combinação dessas escalas divididas com a utilização do algoritmo matching, onde pesos são atribuídos para as combinações factíveis de escalas de trabalho. O matching de peso máximo será a solução ótima da combinação. Na última fase, as divisões são reconsideradas. Entretanto, algumas melhorias ainda são feitas modificando-se estas divisões, visando, ainda, a redução de número de funcionários e a quantidade de horas-extras. Os diferentes modos de aplicação destes métodos e de sua elaboração podem ser vistos em publicações, como Blais et al. (1976), Lessard et al. (1981) e Rousseau et al. (1985).

Semelhante ao problema das escalas de motoristas de ônibus, o problema das escalas de trabalho para a tripulação ferroviária consiste em construir as escalas de trabalho e designá-las aos funcionários de tal maneira que a tabela de demandas seja cumprida. Maiores detalhes deste problema podem ser encontrados em Caprara et al. (1997). Inicialmente, toma-se uma tabela de serviços de trem, a ser cumprida diariamente em certos períodos de tempo. Alguns segmentos de jornada são definidos para cada funcionário. Estes segmentos definem os tempos inicial e final de uma jornada e as estações de entrada e de saída para um funcionário. Quando um funcionário termina sua jornada, o mesmo pode retornar à estação base (início da jornada), ou deslocar-se a outra estação para iniciar outra jornada. Este deslocamento não é considerado como uma jornada de trabalho e o funcionário tem um intervalo de pelo menos um dia para fazer este deslocamento e iniciar sua próxima jornada de trabalho em uma estação. O problema consiste em encontrar um conjunto de escalas, que cubra toda a tripulação e satisfaça a demanda, com um custo mínimo. Para resolver este problema, considera-se um grafo direcionado, onde o arco  $(i, j)$  existe se, e somente se, a sequência de trabalho  $(i, j)$  existir, ou seja, o funcionário  $j$  puder substituir o funcionário  $i$  em uma determinada estação. Utiliza-se o modelo clássico de cobertura de vértices, com a

Relaxação Lagrangeana para modelos de Programação Linear Inteira (FISHER, 1981). Este trabalho foi implementado em uma companhia férrea italiana, e os resultados desta aproximação Lagrangeana foram melhores do que os resultados heurísticos, utilizados pela companhia.

O problema seguinte é semelhante ao de construção de escalas para tripulação ferroviária, e está apresentado com mais detalhes em Gamache et al. (1999).

A resolução é feita em duas fases. Na primeira, formam-se pares de segmentos de voo em dois dias consecutivos, onde a tripulação viaja e retorna à cidade base. Alguns dias isolados, que não formam pares, são separados dos demais períodos. O problema de tripulação em pares consiste em encontrar o conjunto de pares que cobre todos os segmentos de voo, com custo mínimo. O custo de um par de voos é dado pela duração total deste par.

Na segunda fase, toma-se a listagem da tripulação, construindo-se a escala mensal personalizada para cada funcionário, de acordo com sua atividade. O método de geração de colunas pode ser utilizado para resolver este problema, gerando vários subproblemas NP - difíceis.

Esse procedimento de solução foi testado na companhia Air France, onde o problema pode ser dimensionado do seguinte modo: milhares de restrições, centenas de subproblemas e centenas de milhares de arcos. Alguns testes com o programa CADET mostram que a aplicação do método de geração de colunas é mais eficiente computacionalmente para o problema da companhia Air France, e os resultados são melhores do que os métodos heurísticos utilizados pela companhia.

### **2.3.2 Métodos Heurísticos e Meta heurísticos**

Lourenço et al. (2001) utilizam duas meta heurísticas multiobjetivos para solucionar o PPT: Busca Tabu e Algoritmo Genético. Na abordagem apresentada, são consideradas duas funções objetivo, uma com os custos operacionais do problema ao que se refere a quantidade de tripulantes e tempo operacional, e outra com custos por quebra de restrições operacionais, por exemplo exceder o máximo de trocas de veículos. Na Busca Tabu, os autores consideram duas listas tabu, uma de inserção e outra de remoção de jornadas. A primeira contém a lista de jornadas que foram removidas e não podem ser inseridas e a segunda lista contém as jornadas incluídas que não podem ser removidas. A Busca Tabu é realizada para cada função objetivo e posteriormente é aplicada com a função de soma ponderada das duas funções objetivos. Um

processo para otimizar a solução é proposto, onde a Busca Tabu é realizada com várias iterações com objetivo de encontrar soluções viáveis, utilizando somente de inserção de tarefas, e a meta heurística GRASP é utilizada para selecionar as melhores jornadas geradas no processo de Busca Tabu. No algoritmo genético, a criação de novas populações se baseia na escolha aleatória de uma das funções objetivo para conseguir uma diversificação maior da população. É proposto a utilização de um método de cruzamento entre duas populações utilizando GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure). Os testes foram comparados com dados utilizados em uma empresa de Portugal e um método de programação linear proposto por Beasley (1987).

Um Algoritmo Genético Híbrido para resolver o problema de programação da tripulação foi proposto por Li e Kwan (2003). Em sua abordagem, os testes foram realizados tanto com instâncias de problemas de ônibus urbano quanto de linhas de trem, com dados reais de empresas inglesas. Uma heurística gulosa é utilizada para construir uma escala, em que as jornadas são selecionadas sequencialmente em um conjunto grande de potenciais jornadas viáveis geradas previamente. As jornadas individuais e a escala devem ser avaliadas como um único processo. A teoria do conjunto fuzzy é aplicada sobre tais avaliações. Para jornadas individuais, a sua viabilidade é avaliada por critérios identificados a partir do conhecimento prático do problema. O Algoritmo Genético é usado para gerar uma distribuição de pesos quase ótimos entre os critérios, onde uma avaliação ponderada de um único valor pode ser computada para cada jornada. A programação construída a partir da distribuição dos pesos gerados é avaliada pela função de aptidão do Algoritmo Genético. Para essa função, são utilizados os objetivos de minimizar jornadas e o custo total, formulados como uma meta fuzzy. A partir dos resultados apresentados o algoritmo proposto consegue resolver problemas de tamanho real.

Uma utilização da meta heurística Busca Tabu para resolver o PPT foi apresentada em Marinho et al. (2004). Nessa implementação, foram utilizadas duas estruturas de vizinhança, uma de realocação e outra de troca de tarefas entre jornadas. A Lista Tabu tem como finalidade evitar que a heurística entre em um ciclo durante a busca do melhor vizinho. A lista é utilizada para armazenar as últimas soluções avaliadas, de modo a não permitir que o método volte para uma solução anteriormente avaliada. Três implementações da Busca Tabu foram abordadas no trabalho: a Busca Tabu com o primeiro vizinho de melhora em uma porcentagem da vizinhança; a Busca Tabu com o melhor vizinho em uma vizinhança variável e a Busca Tabu com o primeiro vizinho de melhora em uma porcentagem da vizinhança com diversificação, onde após executar um certo número de iterações sem encontrar uma solução

viável, o procedimento é reiniciado. Os testes realizados com os três tipos de busca obtiveram resultados relevantes ao serem comparados com outra heurística abordada na literatura e com dados reais de uma empresa.

Em Silva e Cunha (2010) o PPT é resolvido pela combinação da meta heurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) com o método de busca em vizinhança de grande porte, o VLNS (Very Large-Scale Neighborhood Search). Essa abordagem permite que sejam resolvidos problemas reais em empresas de grande porte, em um tempo considerável e com bons resultados, devido à possibilidade de explorar vizinhanças com um número muito grande de soluções adjacentes. Os resultados apresentados referem-se à resolução de problemas reais de uma empresa de Belo Horizonte-MG. Para todos os testes realizados, a abordagem utilizada consegue melhorias significativas na programação da tripulação em relação à solução adotada pela empresa.

Gonçalves (2010) propõe um estudo comparativo entre as meta heurísticas Busca Tabu e Iterated Local Search (ILS) e uma metodologia exata de programação matemática. Para a utilização das meta heurísticas foi necessário a geração de uma solução inicial, onde esta foi gerada de forma sequencial. A cada iteração, uma tarefa é escolhida sequencialmente e alocada à jornada existente, desde que a jornada permaneça viável. Como estrutura de vizinhança foram utilizados os movimentos de troca e realocação de tarefas. Na Busca Tabu, a lista tabu é definida como uma fila circular, onde os vizinhos mais antigos são eliminados à medida que os novos são adicionados e a fila está cheia. A meta heurística ILS é combinada com a meta heurística Variable Neighborhood Descent (VND) - a qual será apresentada com mais detalhes na seção 2.3.2.1 - onde o VND é utilizado como método de busca local do ILS. Na utilização do ILS um processo de perturbação é apresentado, onde sucessivos movimentos aleatórios baseados na estrutura de vizinhança são empregados. Como critério de aceitação, uma nova solução é aceita se ela for melhor do que a melhor solução encontrada. Para as meta heurísticas, a função de avaliação proposta leva em consideração soluções viáveis e inviáveis. As soluções inviáveis são penalizadas de forma a privilegiar a eliminação destas da solução final. A metodologia exata proposta utiliza a abordagem de geração de colunas, onde as colunas são geradas a partir de Enumeração Exaustiva. No modelo exato só são aceitas soluções que atendam todas as restrições, ou seja, soluções viáveis. Os resultados apresentados mostram que os métodos propostos obtêm soluções muito próximas e provou-se otimalidade em 93,75% nos testes considerados.

Há as heurísticas de divisões sucessivas que constroem as escalas de trabalho em apenas duas fases. Num primeiro momento, as divisões das escalas são feitas e combinadas,



formando-se uma jornada diária de trabalho para a tripulação. Estas escalas combinadas devem formar dias de trabalho factíveis, com a mesma ideia utilizada no primeiro estágio do método Hastus.

Na última fase, as divisões são modificadas várias vezes e o algoritmo heurístico constrói jornadas de trabalho factíveis, melhorando sensivelmente as escalas obtidas na primeira fase, com relação ao número de motoristas e de horas extras.

As publicações que mostraram estes métodos heurísticos e suas aplicações bem detalhadas são: Manington e Wren (1975), Wilhelm (1975), Wren et al. (1985).

### 2.3.2.1 Variable Neighborhood Search – VNS

Nesta seção será apresentada a fundamentação teórica da VNS e VND. A Busca em Vizinhança Variável, VNS (Variable Neighborhood Search), é uma meta heurística que foi proposta em meados da década de 90, por (MLADENOVIC, 1995; MLADENOVIC; HANSEN, 1997). É baseada num princípio simples: explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança durante o processo de busca (HANSEN; MLADENOVIC, 1999; HANSEN; MLADENOVIC, 2001d). Ou seja, a meta heurística de busca em vizinhança variável é uma extensão de um algoritmo de busca local que utiliza a estratégia de mudança de tamanho da vizinhança para sair de soluções ótimas locais. Seu desenvolvimento foi rápido, com inúmeras publicações (HANSEN; MLADENOVIC; PÉREZ, 2001; HANSEN; MLADENOVIC, 2001a; HANSEN; MLADENOVIC, 2001b; HANSEN; MLADENOVIC, 2002; HANSEN; MLADENOVIC, 2003a; HANSEN; MLADENOVIC, 2003b).

Por ter surgido depois, o VNS trata de um método mais aprimorado em relação ao VND, já que ele aceita trocas que melhoram a solução atual e constrói novas soluções partindo das dadas iniciais. Já seu antecessor explora o universo de soluções através das trocas de estruturas, permitindo somente a entrada de elementos que melhoram a solução corrente e repete os processos conforme haja a possibilidade de melhora.

Segundo Mladenovic (1995), uma estrutura de vizinhança no espaço de soluções  $S$  é uma aplicação:

$$N : X \rightarrow S = \{N(x) : N(x) \subseteq X\}, \quad (2.1)$$

que a cada solução  $x \in X$  associa um conjunto de soluções  $N(x) \subseteq X$ , denominado vizinhança de  $x$ .

Denote por  $N_k$ , ( $k = 1, \dots, k_{max}$ ), um conjunto finito de estruturas de vizinhança pré-selecionadas e por  $N_k(x)$  o conjunto de soluções na  $k$  – ésima vizinhança de  $x$ . As vizinhanças  $N_k$  podem ser caracterizadas por uma ou mais métricas (ou quase-métricas) introduzidas num espaço de solução  $X$ .

A troca de estruturas representa a substituição do componente analisado por outro mais eficiente encontrado pelo processo de busca VNS ou VND. A essência do método VND consiste em buscar a melhora da solução atual utilizando uma estrutura de vizinhança principal. O método troca a vizinhança corrente pela próxima quando a melhora não é mais viável e quando uma melhor solução é encontrada ele retorna para a vizinhança principal. O fim do algoritmo é dado quando não há mais a possibilidade de melhorar a solução atual após o uso de todas as estruturas de vizinhança.

O VNS, ao partir de uma solução inicial, realiza busca local em sua vizinhança igualmente ao VND. Todavia, ao passo de que a solução inicial não é melhorada, ele percorre vizinhos cada vez mais distantes da solução atual e caso encontre uma solução que melhor satisfaça, inicia uma nova busca, bem como o VND. Portanto, o VNS não percorre exatamente uma vizinhança pré-estabelecida e sim restringe a busca por uma nova solução melhor que a atual. Na figura 2 apresenta-se o pseudocódigo do algoritmo VNS.

Figura 2: Procedimento VNS

```

Procedimento VNS
  S := S0;
  K := 1;
  NK := 1;
  While (critério de parada) do
    Begin
      While (K < Kmax) do
        Begin
          Aplicar_busca_local S' := NK(S);
          If f(S') < f(S) then
            begin
              S := S';
              K := 1;
            end
          else
            k := k + 1;
          End;
        End;
      End;
    End;
  End;

```

Fonte: Elaborado pelo autor e baseada em (MLADENOVIC & HANSEN, 1997)

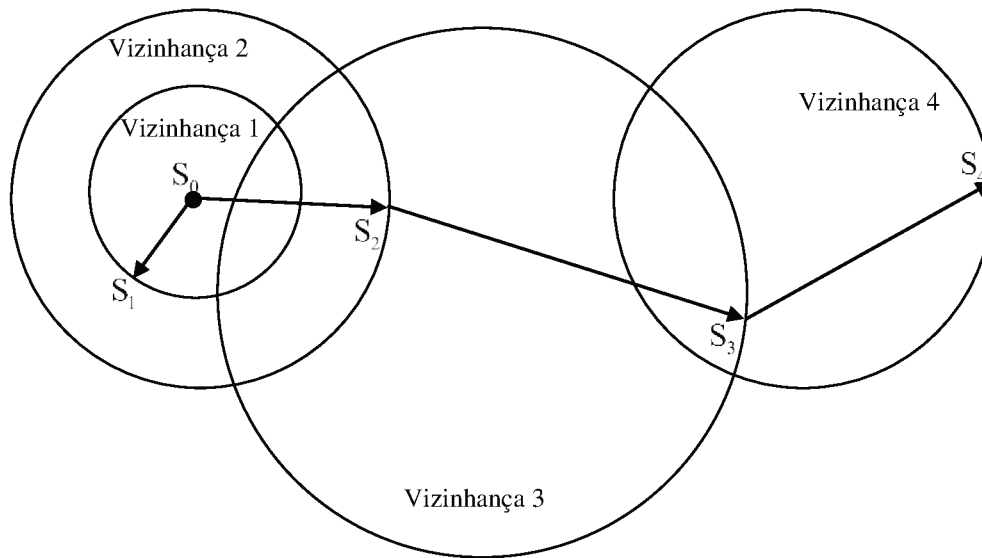
A variável  $S$  recebe uma solução inicial que supostamente será melhorada e a variável  $K$  recebe a primeira estrutura de vizinhança a ser percorrida. Começa então a procura por uma solução melhor que a inicial  $S$ , através da busca pela extensão da vizinhança. Se uma solução melhor for encontrada, ela passa a ser a nova melhor solução atual e o processo de busca do início ao fim das vizinhanças é reiniciado. O algoritmo assim trabalha até todas as vizinhanças serem percorridas ou até o critério de parada ser alcançado. Uma vez que não seja viável uma solução melhor que a corrente, essa, portanto, é assumida como a melhor solução para o problema.

Nota-se que com a inicialização de uma solução inicial  $S_0$  e após cada iteração é selecionado um vizinho  $S_1$  da vizinhança  $N$ . A busca local é efetuada analisando seus vizinhos e visando alcançar uma solução ótima local  $S_2$ . Se  $S_2$  for melhor que a solução corrente, então  $S_2$  passa a ser a nova melhor solução  $S$  e a busca é reiniciada. Se a solução alcançada não for melhor do que a corrente, o sistema percorrerá o caminho de busca através da próxima estrutura de vizinhança. Quando o critério de parada for atingido, bem como o número máximo de iterações possíveis, a rotina é encerrada.

Na figura 3 pode-se visualizar como funciona o método de busca em vizinhança.

A partir de uma solução  $S$ , uma vizinhança é selecionada e nela é realizada a busca onde uma solução  $S_1$  é encontrada. Essa solução  $S_1$  é comparada a solução  $S$  com o objetivo de avaliar a existência de melhoria. Caso não haja, então retorna-se para a solução  $S$  e uma nova busca é executada, expandindo o raio de busca e aumentando a vizinhança. Uma vez que a solução  $S_2$  é confrontada com a solução  $S$  e apresente melhorias, então ela se torna a solução corrente e a partir dela é iniciada uma nova busca na primeira vizinhança. Portanto, sempre que uma solução melhorada for encontrada, atribui-se à ela a solução corrente e a busca é reiniciada até o critério de parada ser alcançado. A última solução encontrada é considerada a solução ótima ou a que resolve o problema da melhor forma.

Figura 3: Funcionamento do VNS



Fonte: Elaborado pelo autor e baseada em (MLADENOVIC; HANSEN, 1997)

A VNS, ao contrário de muitas meta heurísticas baseadas em busca local, não permite degradação na função objetivo para realizar um movimento, mas explora, a partir de uma solução inicial, uma sequência crescente de vizinhanças, e só realiza o movimento até uma nova solução se esta solução for melhor que a solução incumbente.

A meta heurística VNS explora sistematicamente os seguintes fatos:

- Fato 1: Um mínimo local com relação a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente um mínimo local com relação a uma outra;
- Fato 2: Um mínimo global é um mínimo local em relação a todas as estruturas possíveis de vizinhança;
- Fato 3: Para muitos problemas, um mínimo local com respeito a uma ou a várias vizinhanças são relativamente próximos um do outro.

Os fatos 1 a 3 sugerem, então, o uso de várias estruturas de vizinhança nas buscas locais para abordar um problema de otimização, ou seja, a ideia é definir um conjunto de estruturas de vizinhanças que podem ser utilizadas de forma determinística, de forma aleatória ou determinística e aleatória. Essas formas de utilizar as estruturas de vizinhanças produzem algoritmos VNS de desempenhos diferentes.

O fato 3 é particularmente importante na formulação de um algoritmo VNS, o qual é de caráter empírico, implica que uma solução ótima local fornece informações importantes em relação ao ótimo global especialmente se a solução ótima local for de excelente qualidade. Existe também a observação empírica de que as soluções ótimas locais geralmente estão

concentradas em regiões específicas do espaço de busca. Se as soluções ótimas locais estivessem uniformemente distribuídas no espaço de busca todas as heurísticas baseadas em uma única vizinhança se tornariam ineficientes. Portanto, se for encontrado um ótimo local da região em que se encontra o ótimo global então uma meta heurística tipo VNS tem grandes chances de encontrar esse ótimo global. Por outro lado, se o ótimo global se encontra em outra região então a única possibilidade de encontrar o ótimo global é implementar um processo de diversificação. Por esse motivo um equilíbrio entre intensificação e diversificação no processo de busca pode ser importante em uma meta heurística.

### **2.3.3 Métodos Híbridos**

Em muitos casos, devido ao tamanho das instâncias abordadas, a utilização destas técnicas, de forma única, se torna inviável. Logo, a combinação entre elas é considerada para resolver instâncias de grande porte. Uma abordagem híbrida é apresentada em Yunes et al. (2005) para resolver tanto o problema de programação da tripulação como o problema de rodízio das tripulações. Os autores utilizam as seguintes técnicas para resolver os problemas: programação inteira, programação por restrição e geração de colunas, utilizando a abordagem de caminho mínimo com restrição em um grafo acíclico dirigido. Esse subproblema é resolvido com um algoritmo de programação dinâmica. Para resolver o PPT, inicialmente foi utilizada a técnica de relaxação linear para encontrar bons limites inferiores. Esses limites são utilizados na geração de colunas com o objetivo de gerar novas jornadas viáveis com custo reduzido negativo. Ao encontrar um novo conjunto de jornadas o problema de escalonamento é resolvido por programação linear. Esse processo é repetido até que uma condição de parada seja alcançada ou o processo de geração de colunas não encontre nenhuma jornada com custo reduzido negativo. Nesse último caso, a otimalidade da solução está provada. Os resultados apresentados mostram que foi possível encontrar a otimalidade em um tempo razoável com instâncias de até 100 viagens.

Mauri e Lorena (2007) apresentam um método híbrido utilizando algoritmo de treinamento populacional e programação linear para gerar os horários dos motoristas em um sistema de transporte público. O método utiliza o modelo clássico de particionamento, onde os custos que compõem a função objetivo levam em consideração o total de condutores, de horas extras e de horas ociosas. No algoritmo de treinamento foi utilizada uma busca local, de modo a avaliar vários tamanhos de vizinhança, gerando assim um grande número de jornadas

de modo a cobrir todas as tarefas. Em seguida, é utilizado um modelo de programação linear para reduzir os custos das jornadas, de modo que todas as tarefas sejam realizadas. De acordo com os autores, os resultados apresentados são considerados bons e em tempo de execução razoável se comparado com Simulated Annealing apresentados em Mauri e Souza (2003).

No trabalho de Gonçalves et al. (2008) é proposta uma metodologia para resolver o PPT utilizando a meta heurística Busca Tabu combinada com Programação Matemática. Nessa implementação, uma solução inicial é gerada utilizando um algoritmo guloso, de modo a criar jornadas que operem sempre com os mesmos veículos. Após essa fase, é definida uma estrutura de vizinhança onde o conjunto de vizinhos são jornadas que possam ter suas tarefas realocadas ou trocadas entre elas. Após a geração da vizinhança, com tamanho predeterminado, a Busca Tabu é executada para melhorar a solução atual. Se esta melhora não acontecer em um número predeterminado de iterações, um procedimento remove algumas tarefas alocadas de modo a gerar um subproblema que é resolvido de forma exata. As tarefas são removidas das jornadas que possuem os maiores tempos de trabalho. Os resultados apresentados mostram que o método híbrido consegue reduzir os custos das horas extras consideravelmente quando comparando com outros métodos que utilizam somente a abordagem heurística.

## 2.4 PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

Para Faludi (1986 apud ANDRADE, 1994), planejamento tem sido levado como prioridade para evitar eventuais surpresas que podem ocorrer, como um ato de prever o futuro e prevenir o sistema de possíveis percalços, ou ainda como estudos de soluções para prováveis eventos. Esta previsão sugerida pelo planejamento é, entretanto, baseada em ocorrências do passado e do presente, em meio a analogias e comparações oriundas de métodos, modelos, processos ou pensamentos que visam explicar o provável comportamento de alguns eventos no futuro.

Em suma, as etapas fundamentais de um planejamento são: traçar objetivos e metas coerentes, estabelecer prioridades compatíveis com aqueles objetivos e utilizar, da melhor forma, sua dotação de fatores de produção (recursos, capital e trabalho).

Segundo a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) (PIRES et al., 1997), utiliza-se o planejamento para aumentar as chances de alcançar os objetivos estabelecidos, com a qualidade, o custo e o prazo definidos adequadamente. Planejar,

portanto, é contar com uma série de métodos de trabalho e de medidas a adotar que ofereçam maior probabilidade de sucesso.

De acordo com Andrade (1994), sem a formulação de objetivos definidos e sem uma consciência clara das possibilidades de aproveitamento das suas aptidões, as sociedades em desenvolvimento estarão condenadas à expressa dependência tecnológica exterior.

Para Adler (1967 apud ANDRADE, 1994), os constantes esforços causados pelos países em desenvolvimento para aumentar sua produção agrícola requerem a disponibilidade de sementes, fertilizantes e outros insumos. Os produtos precisam chegar ao mercado consumidor de forma eficiente. A expansão das indústrias requer o transporte eficiente das matérias-primas, bem como de seus produtos finais. A movimentação das populações em grandes centros urbanos alcança volumes cada vez mais significativos, e dela depende em muito a performance das cidades. As exportações necessitam de instalações portuárias adequadas e de um efetivo transporte terrestre para acesso aos portos.

Tudo isso enfatiza que a infraestrutura de transportes é um pré-requisito básico do desenvolvimento econômico, embora, obviamente, não se constitua em sua garantia.

Segundo Barat (1973 apud ANDRADE, 1994), o transporte está envolvido em todos os setores da economia e, portanto, os seus custos incorporam-se aos custos de produção de bens e serviços, portanto torna-se evidente que a sua operação deve-se fazer de forma mais racional e ótima possível, em conformidade com as características específicas de cada modalidade, de modo que a prestação de serviços seja feita ao menor custo e máxima eficiência.

O investimento em transporte deve, portanto, ser visto como a soma de recursos disponíveis que é desviada da produção corrente para gerar uma produção intermediária.

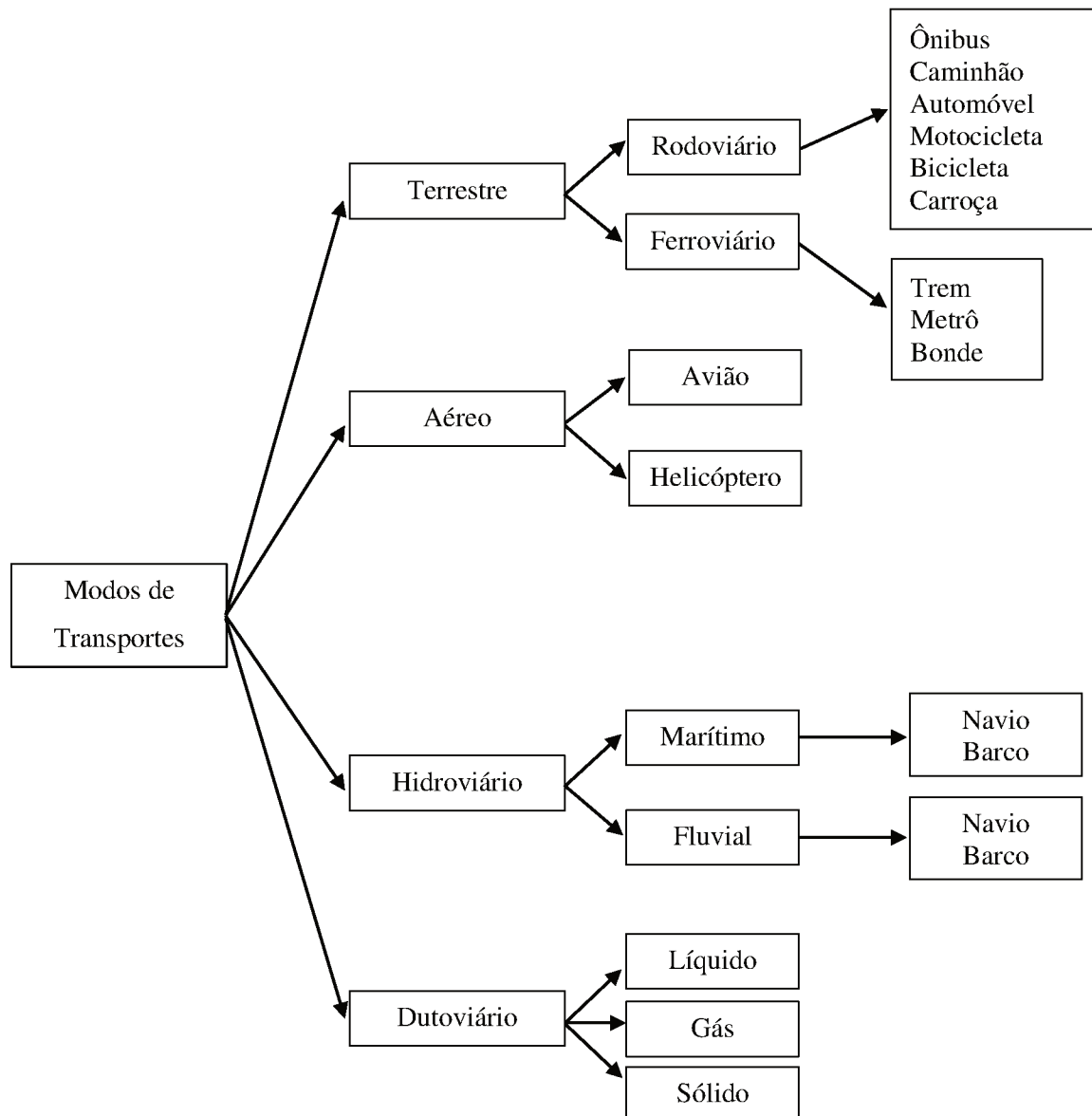
Em relação aos valores monetários do investimento em transportes, deve-se lembrar que nas economias em desenvolvimento, uma excessiva concentração de recursos nesses investimentos pode gerar graves reflexos inflacionários, sem que haja uma demanda real dos mesmos.

Assim, o setor público pode ser forçado a ampliar a disponibilidade interna de receita ou mesmo a utilizar parte das reservas de divisas para responder às pressões geradas por esses investimentos. Por outro lado, quando as deficiências de operação são agravadas, os efeitos inflacionários passam a ser resultantes não somente da necessidade de cobertura dos déficits operacionais, como também da incorporação dos elevados custos de transporte e aos custos dos demais bens e serviços produzidos (ANDRADE, 1994).

Segundo Andrade (1994), o setor de transportes é primordial para a movimentação econômica da região e seu modelo de gestão deve ser compatível com os padrões modernos praticados atualmente. Entretanto, em países subdesenvolvidos como o Brasil, esse setor não é tratado com prioridade, pois não é considerado como produtor de insumo básico. Desta forma, muitos projetos são considerados inviáveis economicamente.

As recorrentes deficiências na operação e nos projetos de ampliação de capacidade do sistema não são atribuídas à atuação do poder público, e sim ao fato desta atuação ocorrer por meios obsoletos da atividade pública, associados a comportamentos e formas de gestão ultrapassada (ANDRADE, 1994).

Figura 4: Modos de transporte e suas ramificações





Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em (ANDRADE, 1994)

Quanto aos modos de transportes em geral, Andrade (1994) os classifica em terrestre, aéreo, hidroviário e dutoviário, com suas respectivas ramificações, de acordo com a figura 4. Além dos meios tradicionais, o avanço tecnológico e as demandas específicas tem conduzido a descoberta de novos meios de transportes, ditos especiais, entre os quais se incluem, correias transportadoras, veículos sobre colchões de ar e transportadoras em cabos aéreos e monotrilhos.

De acordo com a ANTP (PIRES et al., 1997), o planejamento de transporte é a atividade que define a infraestrutura necessária para assegurar a circulação de pessoas e mercadorias, organizando os sistemas de transporte que estarão sujeitos à regulamentação pública, tecnológica e qual o nível de serviço a ser ofertado (transporte público, táxi, transporte especial).

Numa definição um pouco mais minuciosa, tem-se que além do exposto acima, “o planejamento do transporte fundamenta-se na análise do desenvolvimento temporal da demanda existente, nas metas e objetivos e na provisão de um sistema que atenda a essa demanda. Compreende, também, o monitoramento e acompanhamento das operações, visando à implementação de possíveis correções decorrentes de alterações no perfil da demanda estimada. Pode-se dizer que o planejamento de transportes envolve, primeiramente, o dimensionamento e a combinação apropriada das capacidades futuras de prestação de serviços pelas diferentes modalidades. Implica, em seguida, escalonamento das prioridades de investimentos que deverão atender ao crescimento de uma demanda total e de demandas específicas por modalidades para o período do plano. O planejamento deverá levar em consideração, ainda, a localização espacial da demanda futura, segundo as diferentes necessidades das regiões que compõem o espaço econômico nacional” (ANDRADE, 1994).

A ANTP (PIRES et al., 1997) especifica, ainda, quais questões o planejamento do transporte visa responder aos seus administradores:

- Como é possível planejar o futuro do sistema de transporte da cidade? Quais informações são necessárias?
- Como se faz um plano de transporte?
- Como compatibilizar a oferta de transporte com o crescimento da cidade?
- Necessidade de organização do transporte urbano no município;
- Necessidade de organização de sistemas de transporte (coletivo, táxi, carga);

- Necessidade de compatibilizar ações urbanas, de transporte e trânsito.

Para Bruton (1979), o planejamento de transportes é baseado numa série de hipóteses e princípios, dentre os quais, os mais simples são:

- Padrões de viagens são tangíveis, estáveis e previsíveis;
- Demandas por movimentos estão diretamente relacionadas com a distribuição e intensidade de usos do solo, que são possíveis de serem exatamente determinados em alguma data futura.

Bruton (1979) complementa dizendo que junto a essas hipóteses fundamentais, verificou-se a necessidade de assumir que:

- Relacionamentos decisivos existem entre todos os modos de transportes e que o papel futuro de um particular modo não pode ser determinado sem se considerar todos os outros modos;
- O sistema de transportes influencia no desenvolvimento de uma área tão bem quanto serve a esta área;
- Áreas de urbanizações contínuas requerem uma ampla consideração regional da situação de transporte;
- O estudo de transportes é uma parte integrante do processo geral do planejamento e não pode ser considerado adequadamente de forma isolada;
- O processo de planejamento dos transportes é contínuo e requer constante atualização, confirmação e aperfeiçoamento.

Quanto à viabilidade, pode-se dizer que, como qualquer outro sistema sólido, o sistema de transportes deverá desempenhar sua função de produtor de serviços intermediários de forma mais adaptada à sua operação economicamente viável. Sendo assim, Andrade (1994) define os seguintes objetivos internos do planejamento de transportes:

- Minimizar os custos operacionais de prestação de serviços;
- Minimizar os custos de capital;
- Minimizar o tempo de percurso;
- Ampliar a segurança do transporte.

Os sistemas de transporte têm por finalidade atender a objetivos sociais, políticos e econômicos, da forma o mais eficiente e eficaz possível. Assim, Andrade (1994) define de forma sintética alguns objetivos que dizem respeito ao planejamento de transportes:

**Objetivos econômicos:** Facilitar a incorporação de recursos naturais subutilizados ou não utilizados; Estimular a produção industrial; Elevar os níveis de produtividade e facilitar o escoamento da produção agrícola; Estimular o desenvolvimento e a incorporação de novas regiões através de projetos integrados.

**Objetivos político-sociais:** Maior integração nacional com eliminação de tensões sociais e políticas resultantes do isolamento de regiões; Planejamento ou indução de movimentos migratórios; Melhoria dos padrões de atendimento social em regiões estagnadas, entre outros.

Segundo Gakenheimer (1976 apud VASCONCELOS, 1996), o processo disseminado de planejamento de transportes foi desenvolvido primeiramente nos EUA, na década de cinquenta. Conhecido como Urban Transportation Planning System (UTPS), seu nascimento pode ser datado quando da edição do “Highway Act” em 1962, nos EUA, fato que marcou época devido a um amplo programa de construção rodoviária ao longo do país.

De acordo com Vasconcelos (1996), o processo na fase inicial “forneceu embasamento técnico ao grande esforço de construção de rodovias, assim como a algumas políticas de apoio ao automóvel. Antes dos anos sessenta, os procedimentos identificavam necessidades e geravam propostas sem questionar seus efeitos negativos”. Somente a partir desta década que foi originado um reconhecimento crescente dos impactos socioambientais causados pelo aumento do tráfego, onde se tornou presente a necessidade de balancear os custos financeiros a estes custos socioambientais.

Além do largo uso nos EUA, o UTPS foi também utilizado no restante do mundo, inclusive em países em desenvolvimento, com estudos e projetos com início na década de setenta.

De acordo com Dupoy (1975 apud VASCONCELOS, 1996), o UTPS, desde o seu início, passou por uma evolução em três etapas: Desenvolvimento científico (aperfeiçoamento da base matemática); Promoção pública (uso generalizado pelas agências de transporte) e Transferência (para ser usado em outros países).

Dimitriou (1992 apud VASCONCELOS, 1996) sinaliza um processo semelhante de internacionalização, entretanto, dividido em cinco etapas bem definidas temporal e historicamente, dando ênfase ao papel das agências internacionais de financiamento, empresas de consultoria e universidades na exportação dos processos para fora dos EUA. As cinco etapas que Dimitriou cita são as seguintes: Desenvolvimento conceitual (1946-1955); Desenvolvimento operacional (1955-1964); Estabilidade conceitual (1965-1969); Impasse e

revisão crítica (nos países industrializados) e uso disseminado nos países em desenvolvimento (1969-1976) e Perplexidade conceitual e improvisação/renovação (a partir de 1976).

Dimitriou continua, dizendo que essa última fase é singularmente importante porque mostra um descontentamento crescente com o UTPS, à medida que os profissionais passaram a admitir sua baixa confiança em relação à capacidade de previsões a longo prazo vinda dos modelos. A partir disso, começou-se a sugerir um enfoque mais operacional, orientado a um apoio permanente ao processo de tomada de decisão. Junto a esses fatos, iniciou-se a crítica ao uso de dados agregados e a transferência descontrolada dos procedimentos para os países em desenvolvimento.

Segundo Jones (1990 apud VASCONCELOS, 1996), o processo de três etapas dominante nos anos sessenta (geração, distribuição e atribuição), desenvolvido com o pensamento voltado ao automóvel, foi aprimorado com a inclusão da quarta etapa – escolha modal – que considerava as trocas entre os meios privados e públicos de locomoção. Por conseguinte, o parâmetro de análise mudou de viagens de veículos para as viagens de pessoas. Finalmente, a avaliação foi aprimorada substituindo-se a simples análise do tempo de viagem pelo conceito de *custo generalizado de viagem*, o qual inclui todos os recursos financeiros e de tempo alocados ao processo de deslocamento. Já nos anos setenta, as mudanças tiveram maior caráter político, incluindo a análise de condições de transporte de grupos sociais específicos (como os idosos, por exemplo) e a consideração de formas não triviais de transporte. Além dessas alterações, foi dada maior ênfase ao planejamento local e de curto prazo, assim como a participação da comunidade nas tomadas de decisões.

Em termos científicos, complementa Vasconcelos (1996),

“a única mudança profunda ocorreu nos anos setenta, quando a análise das viagens individuais foi complementada pela análise das viagens familiares, seguindo os passos da escola de análise de orçamentos de tempos e espaço. Essa mudança caracterizou o que foi denominado de “era da análise da atividade humana”: as interações e as limitações das pessoas ao organizar seus deslocamentos, e não as viagens em si, passaram ao centro da análise”.

A importância da década de setenta para o planejamento de transporte em comparação aos moldes em que é praticado atualmente se mostrou realmente decisiva, tendo em vista que em um encontro de especialistas da área, realizado em Paris, em 1971, para considerar as fraquezas e potencialidades do planejamento dos transportes, enfatizou que segundo Bruton (1979):

“a abordagem conceitual estrita por parte dos profissionais planejadores dos transportes era talvez a maior fraqueza do processo. Eles constataram que os investimentos em proposições de transportes derivadas de planos de transportes e uso do solo tendem a ser avaliados, principalmente em função de seis critérios funcionais do tráfego: a satisfação de demanda observada; a redução ou eliminação de estrangulamentos em rede(s) existente(s); aumento na eficiência de rede(s) existente(s) proposta(s); benefícios brutos aos usuários; custo de capital envolvido na construção da(s) rede(s); e o retorno econômico do investimento.”

Ao considerarmos o poder municipal, tem-se, segundo a ANTP (PIRES et al., 1997), que:

“uma cidade é um sistema complexo de relações que está em permanente mudança. A forma como o solo é usado e ocupado e as condições socioeconômicas dos habitantes determinam a quantidade e o tipo de deslocamentos necessários, que precisam ser atendidos utilizando a infraestrutura viária e os veículos disponíveis. A gestão deste complexo sistema de relações requer a união de esforços entre Estado e sociedade, bem como a organização adequada da administração pública”.

Nesse âmbito, os municípios foram fortalecidos a partir da Constituição de 1988 e podem ter atuação importante na definição de políticas de trânsito e transporte. Assim, segundo a ANTP (PIRES et al., 1997),

“os municípios possuem competência para dar início ao tratamento da maior parte dos problemas que o afetam nesta área:

- Exercendo seu poder de propor e monitorar a política de uso do solo;
- Exercendo seu poder de formular a política de circulação e de transporte adequada aos seus cidadãos;
- Assumindo o papel de gestor e operador do sistema de circulação de pessoas e de mercadorias;
- Definindo as tarifas do transporte público local e estabelecendo a política de cobertura dos custos do sistema;

- Tomando iniciativas para o estabelecimento de parcerias, seja com o setor privado, seja com outros órgãos públicos, para a solução de problemas locais ou regionais;
- Implantando mecanismos destinados à recuperação dos frutos da valorização imobiliária provocada pelas intervenções públicas e privadas em seu território”.

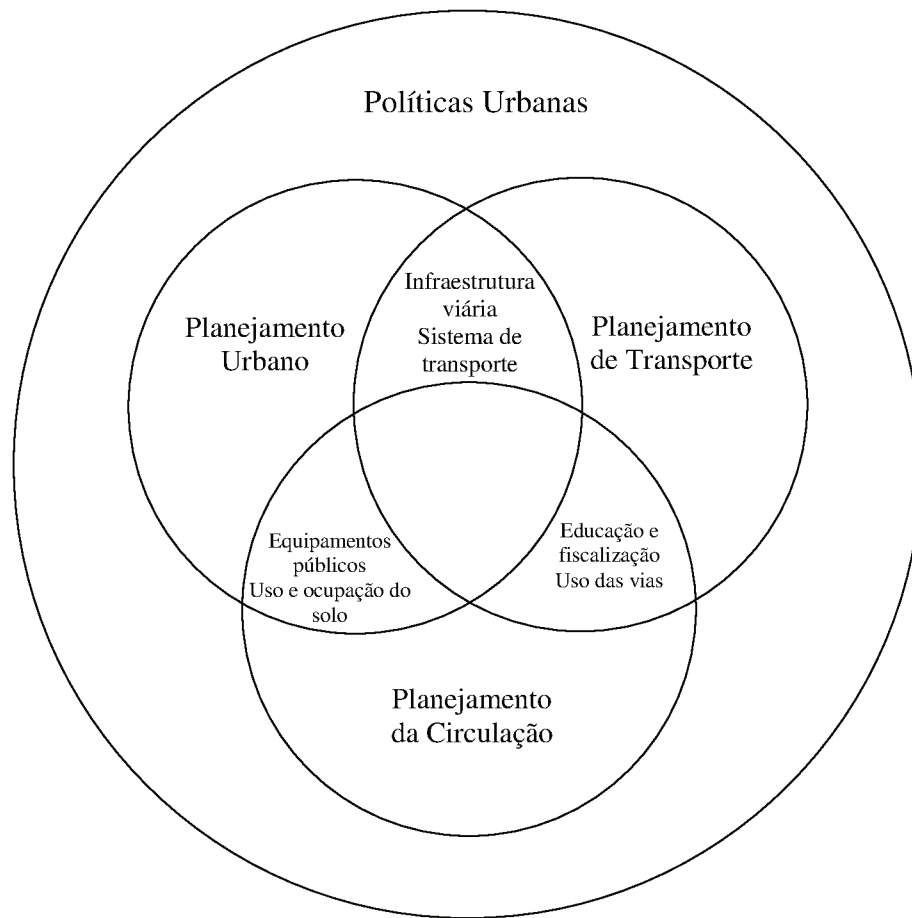
Entretanto, para que seja possível realizar tais ações, torna-se necessária a participação de outras áreas da administração municipal além da responsável pelo planejamento de transportes. Tal planejamento depende e interliga, basicamente, com outros dois níveis de planejamento: o planejamento urbano e planejamento de circulação.

Para um melhor entendimento, são definidos abaixo esses dois níveis de planejamento, de acordo com a ANTP:

- Planejamento urbano: é a atividade que define as condições de uso e ocupação do solo, como por exemplo, os usos habitacional, industrial, comercial e de lazer. Ela define também a localização dos equipamentos públicos como escolas, parques, hospitais e conjuntos habitacionais. Os deslocamentos cotidianos das pessoas e das mercadorias entre origens e destinos são, portanto, diretamente influenciados pelas decisões do planejamento urbano. Esta atividade está normalmente ligada à Secretaria de Planejamento da Prefeitura, embora possa estar sob a responsabilidade de outros órgãos municipais (SEGISMUNDO, 2000).
- Planejamento da circulação: é a atividade ligada ao “trânsito”, ou seja, é aquela que define como a infraestrutura viária poderá ser utilizada por pessoas e veículos. Esta definição envolve também as atividades de administração do aparato de trânsito, de fiscalização sobre o comportamento dos usuários e de promoção da educação para o trânsito. Ao definir como as vias podem ser usadas, o planejamento da circulação influencia a escolha dos caminhos e dos meios de transporte que têm melhores condições de serem utilizados. O planejamento da circulação está ligado aos órgãos municipais de trânsito ou então incluído na Secretaria Municipal de Transportes (SEGISMUNDO, 2000).

A figura 5 demonstra a interação entre ambas as áreas.

Figura 5: Inter-relação entre os tipos de planejamento



Fonte: Elaborado pelo autor e baseada em (PIRES et al., 1997)

Segundo a ANTP (PIRES et al., 1997), a elaboração de um plano de transporte requer alguns parâmetros preliminares, sintetizados a seguir:

- Caracterização e definição da área de estudo: Abrange fatores geográficos, de uso e ocupação do solo e institucionais, definindo se a área de estudo é rural ou urbana; se residencial, industrial ou comercial; se de topografia plana, ondulada ou montanhosa, etc.
- Caracterização do sistema de transporte:
  - a) Oferta de transporte: deve ser registrada pela descrição detalhada das redes físicas de transporte (rodoviária, ferroviária), das características dos serviços de transporte público (tecnologia, frota, itinerários, frequência, tarifas, nível de serviço) e das condições do transporte de carga.
  - b) Estrutura institucional: identificação dos órgãos operadores das diversas modalidades de transporte coletivo existentes no local; da legislação e

regulamentação de cada um desses sistemas de transporte, considerando a interface com outros municípios e com as esferas estadual e federal.

c) Demanda: após a caracterização de todo o sistema de transporte, é necessário o entendimento de como as pessoas e cargas circulam pelo município utilizando esta estrutura. Para tanto, é necessário a realização de pesquisas Origem-Destino sobre os principais polos de atração e de produção de viagens, além do tipo e quantidade de viagens.

- **Análise:**

Ainda de acordo com a ANTP (PIRES et al., 1997), a análise dos dados colhidos pode ser realizada considerando-se alguns objetivos gerais, ou indicadores, como: acessibilidade, nível de serviço do transporte, segurança, fluidez, custo do transporte e qualidade ambiental. No entanto, tais indicadores podem assumir nomes e/ou definições ligeiramente diferentes.

- **Propostas:**

O plano de transporte pode fazer propostas de alterações consideráveis nas redes existentes, como também de medidas em ordem de gestão e pequenas obras de melhoria, com custos razoáveis. Em todos os casos, as propostas devem levantar os pretextos e metas estabelecidas pelo Poder Público e ser separadas quanto ao seu objetivo, levantando-se os seguintes critérios:

- a) Infraestrutura viária (vias, calçadas e terminais);
- b) Infraestrutura específica do transporte público (vias de ônibus, ferrovias);
- c) Sistemas de transporte público: tecnologia, nível de serviço, forma de remuneração;
- d) Sistemas especiais: pedestres, bicicletas, táxi, lotação, escolar, transporte fretado;
- e) Transporte de carga.

- **Sistematização do Plano:**

O plano deve ser formado por um conjunto de definições contendo as seguintes informações:

- a) Bases legais de sua implementação;
- b) Responsabilidades sobre sua execução entre as várias entidades municipais (ou metropolitanas);
- c) Prazos a serem seguidos;
- d) Fonte e destinação dos recursos a serem alocados;

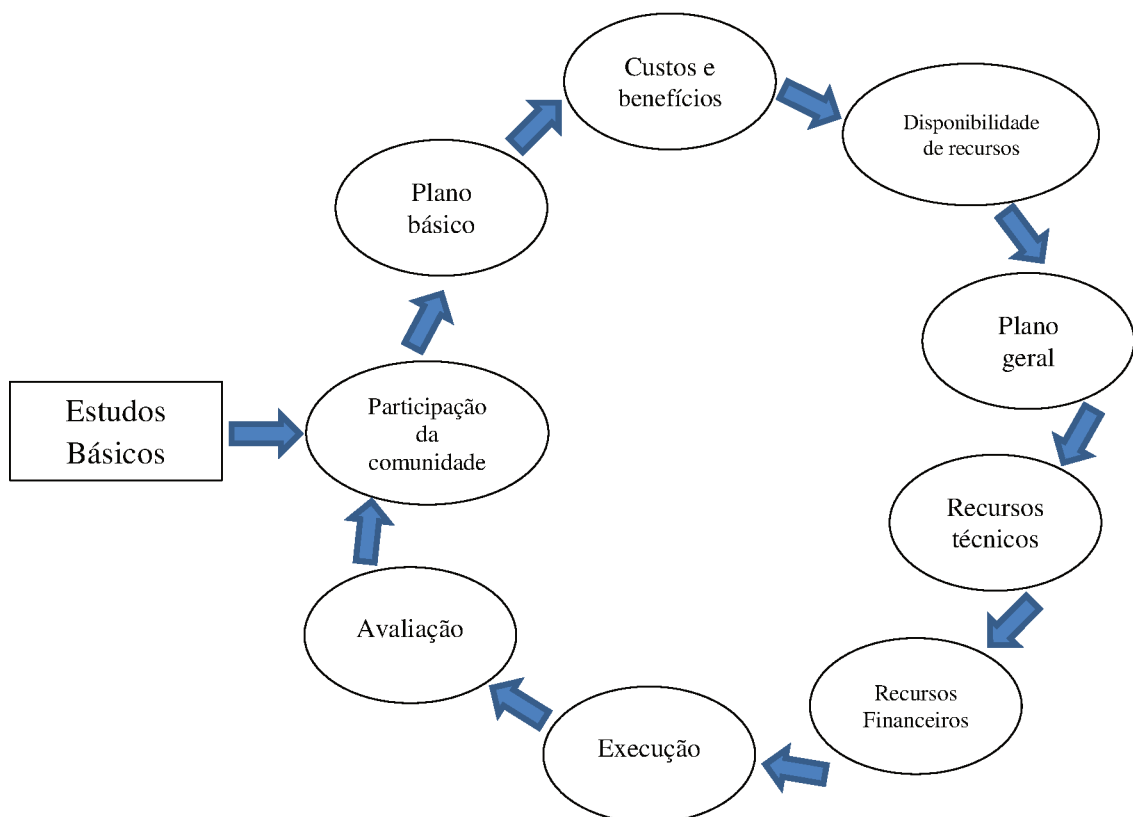


- e) Projetos e programas específicos;
- f) Relacionamento com planejamento urbano e o trânsito;
- g) Mecanismos de medição de impactos e de avaliação de resultados, inclusive a participação da sociedade.

As etapas básicas (figura 6) que compõem a elaboração do plano encontram-se listadas a seguir:

- a) Analisar os mecanismos institucionais e de planejamento disponíveis no município;
- b) Analisar as condições atuais do sistema de transporte e suas deficiências;
- c) Definir objetivos e metas para o sistema de transporte, compatibilizando-os com o planejamento urbano;
- d) Desenvolver o planejamento, definindo os recursos institucionais e financeiros para efetivar as ações de curto, médio e longo prazo.

Figura 6: Fluxograma das atividades de elaboração do plano de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em (PIRES et al., 1997)

## 2.5 TRANSPORTE PÚBLICO

Neste capítulo serão abordados alguns aspectos relacionados ao transporte público, o qual foi baseado na obra de Reck (2011).

Várias atividades existentes no ambiente urbano encontram-se distribuídas no espaço de acordo com o Plano Diretor Urbanístico ou, de forma mais usual, seguindo um comportamento histórico da área em questão. Nos dois casos, a evolução urbana esteve condicionada a um esquema de canais de passagem de acordo com as tecnologias relacionadas ao transporte, disponíveis para possibilitar a inter-relação necessária entre as atividades urbanas.

Os moradores de determinada cidade podem efetuar suas viagens cotidianas através de seus próprios veículos, ou então fazer uso do transporte público disponível. Esses, por sua vez, não apresentam a flexibilidade do automóvel, como escolha do trajeto ou horário mais conveniente para realizar o deslocamento. Em contrapartida, apresentam como vantagem a economia de espaço urbano para sua realização, principalmente nos grandes centros com baixa mobilidade e área de estacionamento, exigindo menos de 10% de área viária em relação ao transporte particular.

No que lhe diz respeito, o transporte público de passageiros é um tipo de transporte acessível a toda a população mediante pagamento da tarifa, sendo até gratuito em casos pontuais, estando seus serviços designados à obrigação de:

- Explorar infindavelmente uma determinada rede de transportes;
- Transportar todos os passageiros de acordo com um horário fixo;
- Arrecadar tarifas estipuladas pelo poder público;
- Comunicar antecipadamente aos usuários o custo dos serviços;
- Realizar um transporte social em alguns casos, em prol de grupos desprivilegiados socialmente ou para atender determinadas regiões.

Esses compromissos legais ou normativos impostos pelo Poder Público designam os serviços públicos de transporte de passageiros que são representados por:

- Transporte individual (táxi).
- Transporte coletivo (trólebus, ônibus, micro-ônibus/lotação);
- Transporte de massa (metrô, trem de subúrbio, bonde ou pré-metrô);

### 2.5.1 Sistema de Transporte Público de Passageiros

Diferentemente do planejamento tradicional de transportes, o processo de planejamento de um Sistema de Transporte Público de Passageiros (STPP) deve se limitar a aspectos de conceitos operacionais e de características contextuais.

O foco da atenção do planejamento do STPP deve ser na constante revisão da eficiência do sistema tanto em termos operacionais, como dos custos de transporte, na busca de um equilíbrio entre a melhoria da qualidade dos serviços disponibilizados aos usuários e administração de um valor razoável de tarifa. Na busca desse equilíbrio faz-se necessário a conciliação de interesses de três diferentes grupos com preocupações quanto ao desempenho do sistema:

- **Usuários:** Por não terem grandes preocupações com a operação dos serviços, fazem uso de um serviço público apenas para satisfazer sua necessidade de locomoção. Atributos como regularidade, tempo de descolamento, conforto e custos pesam na tomada de decisão no que diz respeito à forma de uso, ou seja, quando, onde e como utilizar o transporte;
- **Operadores:** Obedecendo as diretrizes em relação à forma de prestação de um serviço público, se encarregam da administração e funcionamento de um complexo sistema de transportes com relação ao financiamento, aquisição, manutenção, renovação da frota. Sua atenção é voltada para as variáveis que impactam nos custos e receitas associados ao serviço;
- **Poder público:** Por ser o responsável legal pelo transporte público, deve planejar, regulamentar, programar e fiscalizar a realização dos serviços, agindo frequentemente como mediador nas divergências de interesse entre usuários e operadores, no qual a legislação específica deve se sobressair.

Possuindo uma série de interesses indiretos provocados pelos impactos do sistema, um quarto grupo, a comunidade em geral, é associado. Esses impactos podem ser relacionados ao excesso de ruídos, conflitos com o uso do solo e poluição ambiental. Todavia, esse grupo é desconsiderado, uma vez que o mesmo encontra-se sob responsabilidade do poder público.

Os grupos supracitados compõem os pilares do STPP por serem os principais atores do sistema. Os subcapítulos a seguir englobam as características de interação desses elementos na operação do STPP.

### 2.5.1.1 O Usuário

A necessidade de deslocamento provoca ao usuário a utilização de algum sistema de transporte, no qual cabe ao mesmo a tomada de decisão pelo mais acessível e conveniente, caso haja mais de uma opção de locomoção. No caso da escolha pelo transporte público, alguns fatores avaliados previamente contribuíram na decisão, como origem, destino, tempo e horário.

Através da satisfação gerada pelo STPP em relação às expectativas do usuário pode-se mensurar o desempenho do mesmo. Logo, esse retorno significa um indicador de qualidade dos serviços ofertados. Dentre vários parâmetros considerados pelo usuário, os principais são confiabilidade, tempo de deslocamento, acessibilidade, conforto, conveniência, segurança e custo (tarifas).

A seguir, esses parâmetros são detalhados separadamente, apesar de possuírem forte interligação.

#### a) Confiabilidade

A confiabilidade pode ser designada pela precisão no cumprimento da programação previamente estabelecida para o serviço, assim como as informações aos usuários e o controle sobre os itinerários.

Normalmente, o cumprimento dos itinerários é bem executado pelos operadores. Logo, a avaliação da credibilidade do serviço é notada de duas maneiras pelos usuários: Pontualidade no cumprimento da tabela de horários, principalmente em casos de linhas com intervalos muito longos entre veículos; e regularidade dos intervalos para as linhas de maior frequência.

Tabela 1: Indicadores de confiabilidade dos serviços de transporte público (%)

Qualidade do serviço	Intervalo de linha			
	< 8 min	1 a 2 min	13 a 20 min	21 min
Excelente	85 a 100	90 a 100	95 a 100	98 a 100
Ótimo	75 a 84	80 a 89	90 a 94	95 a 98
Bom	66 a 74	70 a 79	80 a 89	90 a 94
Regular	55 a 65	60 a 69	65 a 79	75 a 89
Ruim	50 a 54	50 a 59	50 a 64	50 a 74
Péssimo	< 50	< 50	< 50	< 50

Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em Colin (1976)

#### b) Tempo de deslocamento

Decorrentes dos locais de origem, destino e das velocidades praticadas pelos veículos, os tempos de deslocamento são alterados pelas condições do tráfego, superfície de rolamento, espaçamento das paradas e sinuosidade das linhas.

Em relação ao tempo de viagem partindo de uma origem até um destino, o mesmo está relacionado com a localização dos pontos de saída e chegada e estrutura da rede de transporte público.

Uma vez que o único pretexto de uso do transporte - no ponto de vista do usuário - é atingir seu objetivo de locomoção, visa-se reduzir ao máximo o tempo deslocamento.

Segue na tabela 2 uma aproximação em relação aos três indicadores de qualidade dos serviços em função do tempo: Tempo total de deslocamento; da velocidade com que o mesmo é cumprido e dos tempos excedentes.

Tabela 2: Indicadores de tempo de deslocamento dos serviços de transporte público

Qualidade do serviço	Tempo de deslocamento (minutos)		
	Total	Em movimento	Excedentes
Excelente	< 15	< 10	< 5
Ótimo	15 a 30	10 a 20	5 a 10
Bom	30 a 45	20 a 30	10 a 15
Regular	45 a 60	30 a 40	15 a 20
Ruim	60 a 90	40 a 60	20 a 30
Péssimo	> 90	> 60	> 30

Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em Colin (1976)

### c) Acessibilidade

A acessibilidade a um STPP pode ser dimensionada pela maior ou menor facilidade de ingresso no transporte público, dividindo-a em dois atributos:

- Acessibilidade locacional: associado à localização dos terminais e pontos de embarque/desembarque do sistema;
- Acessibilidade temporal: associado à frequência dos serviços.

O melhor cenário para o usuário se refere a situações em que os pontos de parada do veículo se encontram próximos a sua origem e destino, desde que seja alta a frequência dos serviços. Contudo, a tendência é que quanto maior a quantidade de linhas do serviço, menor a frequência por linha. Da mesma forma, quanto menor a densidade, maior a frequência.

Portanto, a acessibilidade é definida pela combinação dos tempos de acesso em relação aos pontos de parada e do tempo de espera pelo veículo.

A fim de proporcionar um equilíbrio em termos de satisfação do usuário, o ponto de acesso ao STPP deve se referir às linhas que atendam a maior demanda no sistema e não necessariamente se restringir a uma única linha. A tabela 3 mostra a aproximação da qualidade em função dos atributos de acessibilidade locacional.

Tabela 3: Indicadores de acessibilidade locacional dos serviços de transporte público

Qualidade do serviço	Tempo (minutos)	Distância	
		A pé (m)	Automóvel (km)
Excelente	< 2,0	< 100	< 0,8
Ótimo	2,0 a 4,0	100 a 200	0,8 a 1,6
Bom	4,0 a 7,5	200 a 400	1,6 a 3,2
Regular	7,5 a 12,0	400 a 600	3,2 a 4,8
Ruim	12,0 a 20,0	600 a 1000	4,8 a 8,0
Péssimo	> 20,0	> 1000	> 8,0

Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em Colin (1976)

Através da mensuração da acessibilidade temporal, pode-se obter o intervalo entre veículos sucessivos na linha e, por conseguinte, um tempo médio de espera, dado que é de muito fácil percepção do usuário. Desta forma, define-se como ideal a utilização imediata do transporte público, ou seja, a qualquer momento em que o usuário chegar ao ponto de embarque, deveria existir um veículo aguardando-o, prestes a atender suas necessidades de deslocamento. Por ser um fato inviável de ocorrer, o usuário opta pela redução máxima do tempo de espera.

Entretanto, não são todos os usuários que detém de bom conhecimento em relação às linhas da cidade, o que pode dificultar sua percepção de escolha pelo menor tempo de viagem e espera.

Por consequência desse problema, recomenda-se a fixação de um valor máximo em termos de intervalo entre veículos de uma linha de transporte público, a fim de amenizar uma escolha ruim por parte desse perfil de usuário. Para isso, deve-se levar em conta a demanda em função das áreas que são atendidas pela linha com exclusividade e os períodos do dia típicos de operação.

#### d) Conforto

Por envolverem inúmeros aspectos qualitativos que variam de usuário para usuário, as condições de conforto num deslocamento por transporte público são de difícil mensuração. A ocupação do veículo, possibilidade de viajar sentado, temperatura interna, condições de

ventilação, ruído, aceleração / desaceleração, altura dos degraus, largura das portas, disposição dos assentos e seu material, são alguns parâmetros que podem definir o nível de conforto oferecido pelo serviço.

#### e) Conveniência

A análise do atributo conveniência, bem como o atributo anterior, é de difícil mensuração, sendo diretamente relacionado com as características gerais do sistema. Consequentemente, pode-se dividi-lo em dois aspectos:

- Operação do sistema: necessidade de deslocamento, períodos de operação, oferta do serviço no entropico e forma do sistema de cobrança;
- Condições físicas: qualidade dos pontos de embarque e transferência, informações sobre os serviços e disponibilidade de estacionamentos.

Por serem atributos de grande percepção por parte dos usuário, pode-se citar a inconveniência da transferência compulsória e o resultante tempo de espera como outros parâmetros qualitativos em termos de conveniência.

#### f) Segurança

Apesar do elevado número de ocorrências como furtos, roubos e agressões infringindo a segurança do usuário, considera-se isso um problema social das áreas urbanas, no qual os crimes envoltos em algum ponto do sistema podem afetar o número de usuários do STPP. Logo, faz-se necessário a disseminação da informação para a população, de modo a auxiliá-la a prever-se contra esses eventos.

Porém, o atributo segurança contém não só fatores criminais, mas também de acidentes envolvendo os veículos e a proteção aos usuários de maneira geral.

#### g) Custo (tarifas)

Espera-se por parte do usuário um equilíbrio entre valor da tarifa e qualidade do serviço. Porém, o preço deve ser consequência das condições do STPP. Duas questões são abordadas em função dos aspectos qualidade e tarifa.

- O serviço ofertado vale o preço cobrado?
- O usuário encontra dificuldade para pagar o preço da tarifa?

A primeira questão diz respeito à opinião do usuário em relação à qualidade geral do serviço, no que se refere ao valor cobrado pela tarifa.

A segunda pergunta considera a renda dos usuários em comparação com o valor gasto em transportes. Pelo fato de uma considerável faixa percentual dos usuários possuírem baixa renda, ambas as questões tomam proporções maiores principalmente quando o foco é direcionado para as metodologias utilizadas para os cálculos tarifários, que repassam aos usuários todos os aumentos de custo dos insumos.

Outro fator importante para o usuário é a estrutura tarifária em questão, principalmente, com a extensão dos deslocamentos e com o tipo de integração físico tarifário implantado. Por fim, há a percepção do usuário quanto às tarifas especiais para certo grupo de usuários como estudantes, operários, idosos e desempregados, que devido ao caráter social da medida, estimula-se o uso por parte dos favorecidos.

### **2.5.1.2 O Operador**

O segundo pilar do STPP diz respeito ao responsável pelo controle e operação do transporte, caracterizado pelos operadores. Parte das funções dos mesmos é administrar e operacionalizar uma frota de veículos, garagens e oficinas para a execução de um serviço de utilidade pública.

O operador não está necessariamente vinculado ao órgão gestor do sistema de transportes da região, no qual pode haver um contrato de permissão ou de concessão de serviços para realização das funções estipuladas. O transporte público pode ser dividido de quatro modos, na visão do operador: econômico, operacional, trabalhista e empresarial, conforme explicitado nos seguintes itens:

#### **a) Econômico**

Nos modos de transporte que demandam investimentos altos em infraestrutura, a expectativa de um retorno é baixa devido ao valor cobrado pela tarifa. Logo, a decisão sobre a forma de participação do operador no sistema em termos jurídicos depende do investimento necessário, dos custos operacionais e da expectativa de receitas.

Quando o poder público se responsabiliza pela implantação e manutenção do sistema viário, ou se o mesmo já possui infraestrutura suficiente, os investimentos são reduzidos e menor é a margem de risco por parte do poder privado. Desta forma, independente da participação do operador, deve-se haver um equilíbrio financeiro entre receitas e despesas.

Contudo, a busca desse equilíbrio torna-se o grande gerador de conflitos de interesses entre operador de usuário, devido ao fato de que nem sempre as receitas oriundas do valor



cobrado pelo serviço são suficientes para propiciar um nível de serviço adequado no ponto de vista do usuário.

#### b) Operacional

A existência de mais de uma empresa atuante no mesmo serviço pode ocasionar um concorrência não muito saudável ao sistema, acarretando em uma maior necessidade de controle e fiscalização por parte do poder público. Todavia, devido ao número de usuários cativos, o itinerário é reduzido, forçando o usuário a percorrer longas caminhadas até as vias principais.

Em casos dessa natureza, o poder público deve se fazer presente para intervir o conflito dos diferentes atores do sistema: operador e usuário.

#### c) Trabalhista

A execução do serviço de transporte demanda a presença de três equipes distintas:

- Equipe de Operação: Formada pelos motoristas, cobradores, fiscais e chefes de tráfego;
- Equipe de Manutenção: Formada por mecânicos, funileiros, borracheiros, almoxarifes e chefe de oficina;
- Equipe de Administração: Constituída de escriturários, contadores, caixas e compradores.

Por nem sempre possuírem horários convergentes, muitas vezes parte dessas equipes atua em horários noturnos, gerando um incremento nos custos operacionais do STPP.

Alguns aspectos presentes na relação entre chefe e empregado podem afetar a operação preestabelecida. Muitas vezes, a demanda extrapola a capacidade de oferta dos veículos, o que exige com que o planejamento fuja do padrão e outras estratégias sejam estabelecidas, como o emprego de dupla pegada e hora extra.

Desta forma, a fixação de horários de início e fim das jornadas torna-se impossibilitada, pois cada equipe de operações possui seus horários particulares nas linhas. Junto a isso, os intervalos de descanso são aleatórios, entre o fim e início de duas viagens e nem sempre nas melhores condições, requisitando assim acompanhamento para que o serviço não possua sua qualidade infringida.

#### d) Empresarial

A união dos três enfoques explicitados anteriormente remete ao enfoque empresarial, que tem por função a administração do STPP.

Cabe ao operador a execução do transporte, renovação e manutenção da frota e equipamentos, aquisição de garagens e oficinas, compromissos financeiros para garantir a segurança dos investimentos e a certeza do andamento do serviço. No caso de empresas privadas, deve haver no planejamento financeiro uma margem sobressalente na receita para cobrir eventuais riscos do investimento.

Em contrapartida, se tratando de empresa pública ou de economia mista, o lucro não é tão visado, mas sim a redução dos déficits operacionais para balancear a economia.

### **2.5.1.3 O Poder Público**

É obrigação do poder público a oferta de um serviço de transporte que atenda a população nas áreas municipais ou metropolitanas. São deveres na posição de concedente:

- Planejamento e programação dos serviços: Definir os tipos de linhas, itinerários, frequências, transferências, integrações, horários e tipos de veículos;
- Delegação dos serviços: Incumbir as tarefas aos operadores através dos meios legais dentro da respectiva regulamentação;
- Fiscalização: Avaliar o cumprimento das normas e procedimentos que regulam os serviços e a programação vigente, por parte dos operadores.
- Administração tarifária: Estabelecer os valores tarifários, acompanhar o desempenho das linhas em função da demanda e avaliar os reflexos da variação dos valores dos insumos no custo final do serviço para o usuário;
- Comunicação social: Através do estabelecimento de um meio de participação da comunidade nas decisões, da informação a respeito dos serviços prestados e de identificação de suas necessidades;
- Estabelecimento de um sistema de informações gerenciais: Coletar e disseminar dados e informações necessárias para o gerenciamento do sistema.
- Administração dos terminais do transporte coletivo: Executar os projetos, construção e operação dos pontos de parada e terminais;
- Gerência dos táxis e veículos de aluguel: Regulamentar, fiscalizar e administrar as tarifas, pontos e a comunicação com os usuários dos serviços.

O poder público está constantemente aliado aos outros dois pilares em termos de planejamento e programação dos serviços, situando-se no meio termo entre os conflitos dos mesmos, analisando seus interesses e buscando o equilíbrio do sistema.

Uma vez que o órgão gestor do STPP não estipula 100% da tarifa, cabe a ele as especificações do serviço, bem como o dimensionamento da proporção entre a qualidade do serviço e o valor cobrado ao usuário, através de avaliações de desempenho programadas.

## 2.6 TARIFA

Tarifa é o preço pago pelos usuários ou a contrapartida financeira dos usuários pela utilização dos serviços de transporte público. Ao longo do território brasileiro, são definidos pela autoridade governamental, a partir de estudos técnicos, parâmetros que definem sua composição. A definição da tarifa, para ser concluída, precisa passar pelas seguintes etapas:

- a) Pesquisa e análise de preços de insumos;
- b) Análise dos dados operacionais (quilometragem e frota);
- c) Definição do IPK (Índice de Passageiro por Quilômetro);
- d) Definição da tarifa;
- e) Aprovação da tarifa pela Secretaria de Transportes do estado e homologação pelo Governador.

O valor da tarifa é obtido dividindo-se o custo operacional (custo/Km) pela quantidade de passageiros pagantes (IPK), ambos por quilometro. O custo/Km é calculado a partir de uma planilha que considera os preços dos diferentes insumos (combustível, pneus, peças etc.) e o seu consumo. A metodologia aplicada no Brasil tem como base os estudos da Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, publicados em 1994 e revisados em 1996; enquanto o consumo, ou mais especificamente as quantidades médias consumidas, é expresso por coeficientes técnicos definidos pela legislação.

Os custos operacionais são compostos de custos variáveis e fixos. Os custos variáveis são geralmente apropriados por quilômetro e representados por combustíveis, rodagem e peças de reposição; enquanto os fixos o são pela frota e representados pela mão de obra de operação (motorista e cobradores), depreciação, remuneração do capital investido e despesas administrativas.

Segundo a metodologia aplicada no Brasil, todos os custos operacionais são cobertos pela tarifa, sendo esta a principal fonte de receita para a remuneração das empresas

operadoras do sistema. As tarifas são definidas a partir dos custos operacionais, que se baseiam principalmente na quilometragem programada para cada operadora e na frota regular contratada para a operação. Os reajustes tarifários, por sua ordem, são realizados mediante análise e atualização da planilha de custos, na medida em que ocorrem mudanças nas especificações dos serviços, nos parâmetros de consumo e, em especial, na variação dos preços dos insumos.

a) Pesquisa e análise de preços de insumos

Nesta fase, é feito um levantamento de preço dos principais insumos que compõem a planilha tarifária, tais como: óleo diesel, lubrificante, rodagem, peças e acessórios, depreciação/remuneração de veículo, salário de mão-de-obra e benefícios.

Nos casos do diesel, lubrificante, rodagem e preço de veículo, é feito um levantamento das notas fiscais encaminhadas pelas operadoras, bem como a realização sistemática de pesquisas de mercado e consulta aos órgãos reguladores, como por exemplo, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), para que dentro de um determinado período seja calculada a média dos vários preços levantados. Quanto aos salários e benefícios, os valores adotados são aqueles constantes do acordo coletivo de trabalho, encaminhado pelo Sindicato dos Rodoviários.

Ainda nesta fase, outra análise importante a ser feita diz respeito à ponderação do preço do veículo, por empresa e tipo de equipamento. Como as empresas possuem diferentes tipos de marcas e modelos de chassi e carroceria, com preços e tecnologia diferenciados, torna-se necessária uma ponderação, onde o preço final ponderado será influenciado pela maior quantidade existente dentro do universo total de carrocerias e chassis da empresa.

b) Análise dos dados operacionais (quilometragem e frota)

Esta fase consiste em distribuir, por empresa e tipo de veículo (convencional, articulado e micro-ônibus): a quilometragem programada/mês, a frota operante, a frota total e a reserva. Na frota são também consideradas as quantidades de veículos por faixa etária.

Além do ajuste na frota por empresa, também é feito o ajuste no Fator de Utilização (FU), que define o quantitativo de operadores necessários, com base na quantidade de horas trabalhadas previstas na programação de serviço de cada operadora.

c) Definição do IPK (Índice de Passageiro por Quilômetro)

Para definir a demanda, é necessário um acompanhamento contínuo que possibilite conhecer as características de cada mês, seja em relação ao número de feriados, seja em relação a movimentos de greves e paralisações, entre outros, que influenciam no comportamento da demanda.

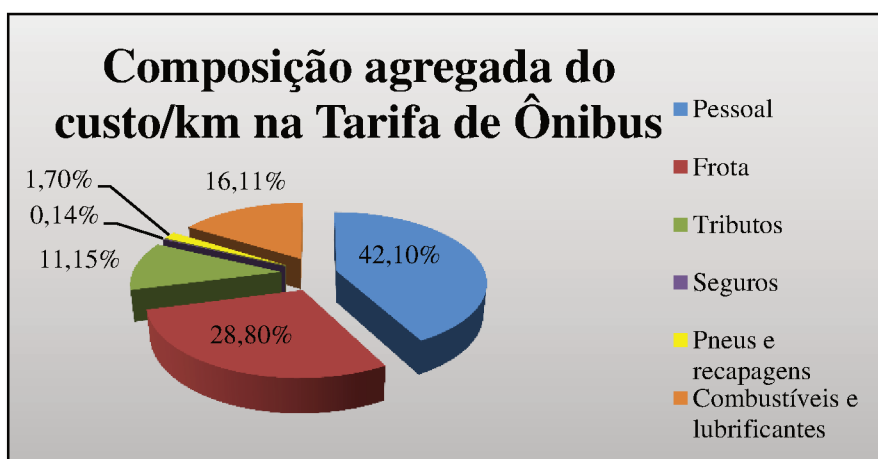
O IPK (Índice de Passageiros por Quilômetro) é o resultado da divisão da demanda equivalente (pagantes do valor total da tarifa) pela quilometragem percorrida. Esse índice será usado posteriormente para se calcular a tarifa.

#### d) Definição da tarifa

Após a apuração dos preços que serão adotados na planilha tarifária, o passo seguinte é justamente o processamento da planilha, para definição do custo/km de cada item que a compõe, por tipo de veículo, e do custo/km do operador. O custo/km do sistema é resultante da média ponderada dos custos/km de cada operador pela sua quilometragem, acrescida da COFINS (3,0%) e do PIS (0,65%). A tarifa técnica é o resultado da divisão deste custo/km acrescido da taxa de gerenciamento do órgão planejador (3,846%) pelo IPK.

O Sistema Básico de Transporte Público Coletivo é composto, em virtude das suas características operacionais heterogêneas, por 06 (seis) faixas tarifárias, divididas entre urbanas e metropolitanas. Assim, a definição da tarifa de cada uma das faixas deve considerar a participação percentual de cada uma delas dentro do sistema. Após a ponderação desta participação, que também deve considerar aspectos operacionais, tais como facilidade de troca, são definidos os valores de tarifa de cada faixa. A média ponderada dos valores das tarifas de cada faixa deve ser o equivalente ao valor da tarifa técnica. Segue abaixo a figura 7 demonstrando a composição tarifária.

Figura 7: Composição tarifária



Fonte: Elaborado pelo autor e baseado em (Datapoa, 2013)

e) Aprovação da tarifa pela Secretaria de Transportes do estado e homologação pelo Governador

Os novos valores tarifários, juntamente com o processo contendo a planilha tarifária, parecer técnico e comprovação dos valores dos insumos utilizados, são encaminhados para a Secretaria de Transportes do Estado para serem apreciados e aprovados, sendo posteriormente encaminhados ao Governador do Distrito Federal, para proceder a sua homologação.

No próximo capítulo, consta a contextualização do caso e a aplicação do método proposto.

### **3. ESTUDO DE CASO E MÉTODO PROPOSTO**

Neste capítulo apresenta-se o estudo de caso e detalham-se as etapas utilizadas para o desenvolvimento do método proposto para solução do mesmo.

#### **3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

Nesta seção descreve-se a empresa em estudo e apontam-se suas principais características em relação à metodologia empregada atualmente na escala dos motoristas, bem como as consequências geradas, parâmetros de qualidade e valor da tarifa.

Atuante na zona sul da cidade de Joinville – SC, a empresa em questão, de grande porte, possui cerca de 850 colaboradores, frota de 260 veículos que percorrem aproximadamente 1.300.000 km/mês e mais de 4500 horários de ônibus distribuídos em 114 itinerários.

O estudo realizado é referente à movimentação no terminal Nova Brasília. O valor da tarifa por passageiro é R\$3,70 caso o passe seja adquirido antes do embarque, e R\$4,50 caso seja adquirido durante o embarque, se tornando uma das tarifas mais caras do Brasil quando o usuário já está embarcado.

Segundo a pesquisa de satisfação do usuário chamada QualiÔnibus, realizada pelo IPPUJ (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Joinville) no final do ano de 2014, os parâmetros mais bem avaliados foram “Facilidade para pagar” e “Atendimento ao cliente”, e os piores foram “Gasto” e “Conforto dos pontos de ônibus”. A nota em relação à satisfação geral do usuário, numa escala de 0 a 10, foi 5,4. Dentro dos parâmetros qualitativos da pesquisa, isso significa que a maior parte dos usuários mantém uma posição indiferente, classificada como “Nem satisfeito, nem insatisfeito”, algo que pode ser melhorado com a

redução de custos da empresa, impactando em tarifas menores e incremento da qualidade do serviço.

O planejamento das escalas é elaborado respeitando normas que favorecem a longevidade da frota, que passam por revisão a cada 20.000km rodados. Todos os ônibus rodam juntos, em média, 43.333km por dia.

Atualmente, as escalas são realizadas por profissionais que estão empregados na empresa há bastante tempo, tendo assim um suficiente conhecimento da maior parte dos motoristas e da frota, a ponto de elaborar os projetos dos mesmos manualmente. Essa metodologia, quando aplicada em uma larga escala de dados, pode se tornar imprecisa, gerando uma solução muito distante da ótima.

Dessa forma, o tempo ocioso entre tarefas por motorista se torna crescente, gerando gastos excessivos para a empresa, o que mostra que manter um profissional interno especializado nesse tipo de planejamento pode ser interessante.

### **3.1.1 Coleta e Tratamento de Dados**

A empresa em estudo foi procurada e em reunião com os responsáveis pela sua operação, foi explicado o interesse em estudar com esse problema. Solícita, foram cedidas todas as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, ou seja, um banco de dados (no formato pdf) de um planejamento diário contendo informações relacionadas aos motoristas e outro contendo informações relacionadas aos veículos, ambos referentes ao Terminal Nova Brasília, na cidade de Joinville, SC.

No primeiro banco de dados constavam os 27 projetos elaborados, para cada um dos 27 motoristas, denominado “Projeto Escala”. No segundo, por sua vez, continha o serviço alocado para cada um dos 13 veículos em seus respectivos projetos, chamados de “Projeto Veículo”. Inicialmente esses dados foram tratados em planilhas Excel. Nas figuras 8 e 9 apresenta-se um exemplo de Projeto Escala e Projeto Veículo, respectivamente, juntamente com suas legendas.



Figura 8: Projeto Escala

Projeto	Motorista	Veículo	Escala	Tarefa	Hora Saída	Hora Chegada	Tempo Ocioso	Ponto Inicial	Ponto Final	Linha Inicial	Linha Final
0650-2	5139	11333	8001	1	03:55	04:08	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	5139	11333	8001	2	04:09	04:22	00:01	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	5139	11333	8001	3	04:22	04:33	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	5139	11333	8001	4	04:33	04:40	00:00	Estação N. Brasília	Jativoca	1507	1507
	5139	11333	8001	5	04:40	05:07	00:00	Jativoca	Estação N. Brasília	1502	1502
	5139	11333	8001	6	05:15	05:29	00:08	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	5139	11333	8001	7	05:29	05:42	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	5139	11333	8001	8	05:42	06:02	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	5139	11333	8001	9	06:02	06:22	00:00	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	5139	11333	8001	10	06:30	06:44	00:08	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	5139	11333	8001	11	06:44	07:00	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	5139	11333	8001	12	07:00	07:28	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	5139	11333	8001	13	07:28	07:42	00:00	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	5139	11333	8001	14	07:42	08:02	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	5139	11333	8001	15	08:04	08:22	00:02	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	5139	11333	8001	16	10:07	10:21	01:45	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	5139	11333	8001	17	10:21	10:35	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	5139	11333	8001	18	10:42	11:01	00:07	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	5139	11333	8001	19	11:01	11:21	00:00	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650

Fonte: Elaborado pelo autor

- Projeto: Número de identificação, conforme organização da empresa, referente aos dados de certo motorista ou veículo;
- Motorista: Número identificador do motorista;
- Veículo: Número identificador do veículo;
- Escala: Número identificador da escala do respectivo motorista;
- Tarefa: Organizadas em ordem cardinal, cada tarefa se refere à linha que é percorrida pelo motorista ou veículo;
- Hora saída: Horário do início da tarefa;
- Hora chegada: Horário do fim da tarefa;

- Tempo ocioso: Diferença de tempo entre o fim da última tarefa e o começo da atual;
- Ponto inicial: Local de saída da tarefa;
- Ponto final: Local de chegada da tarefa;
- Linha inicial: Identificador do caminho de ida percorrido pela tarefa;
- Linha final: Identificador do caminho de volta percorrido pela tarefa;
- Vinculado: Número identificador do conjunto de tarefas do respectivo veículo;
- Tempo viagem: Duração da viagem (Hora Chegada – Hora Saída);
- Tempo parado: Diferença de tempo entre a Hora Chegada da última tarefa e a Hora Saída da atual.

Figura 9: Projeto Veículo

<b>Veículo</b>	<b>Vinculado</b>	<b>Linha Inicial</b>	<b>Linha Final</b>	<b>Tarefa</b>	<b>Hora Saída</b>	<b>Hora Chegada</b>	<b>Tempo Viagem</b>	<b>Tempo Parado</b>	<b>Ponto Inicial</b>	<b>Ponto Final</b>
0651-4	11202	1505	1505	1	06:22	06:36	00:14	00:00	Estação N. Brasília	Morro do Meio
0651-4	11202	1505	1505	2	06:36	06:50	00:14	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0651	0651	3	06:53	07:13	00:20	00:03	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0651	0651	4	07:13	07:34	00:21	00:00	Terminal Central	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0651	0651	5	07:41	08:00	00:19	00:07	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0651	0651	6	08:05	08:24	00:19	00:05	Terminal Central	Estação N. Brasília
0651-4	11202	1505	1505	7	12:25	12:39	00:14	04:01	Estação N. Brasília	Morro do Meio
0651-4	11202	1505	1505	8	12:39	12:53	00:14	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0650	0650	9	13:39	14:02	00:23	00:46	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0650	0650	10	14:04	14:26	00:22	00:02	Terminal Central	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0650	0650	11	16:12	16:32	00:20	01:46	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0650	0650	12	16:38	17:00	00:22	00:06	Terminal Central	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0650	0650	13	17:12	17:33	00:21	00:12	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0650	0650	14	17:39	18:02	00:23	00:06	Terminal Central	Estação N. Brasília
0651-4	11202	0651	0651	15	18:06	18:22	00:16	00:04	Estação N. Brasília	Terminal Central
0651-4	11202	0651	0651	16	18:33	18:52	00:19	00:11	Terminal Central	Estação N. Brasília

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

### 3.2.1 Função Objetivo

Como o principal objetivo do problema é reduzir o tempo ocioso dos motoristas, onde se deve respeitar o momento de intervalo por dia de trabalho, tem-se a função objetivo na equação (3.1), em que  $hi_i$  é o horário de início (hora de saída), em horas, da tarefa  $i$ , e  $hf_{j-1}$  o horário final (horário de chegada), também em horas, da tarefa anterior.

$$Soma\_Tempo\_Ocioso = \sum_{i,j=2}^N (hi_i - hf_{j-1}) - 27 \quad (3.1)$$

O valor 27 na equação (3.1) consiste no tempo de intervalo de descanso/refeição, em horas, que todos os motoristas tem direito. O somatório inicia em 2 pelo fato da primeira tarefa não possuir tempo ocioso e percorre até a última tarefa  $N$ .

### 3.2.2 Premissas Consideradas

Os critérios e restrições estabelecidos para as trocas ocorrerem com factibilidade são:

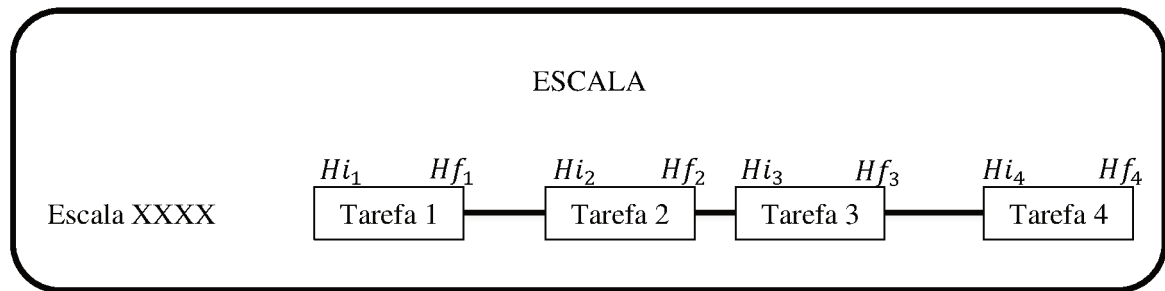
- Haver espaço no projeto para alocação de uma nova tarefa;
- A tarefa candidata a ser alocada para um novo projeto deve ter o ponto inicial no mesmo local onde o motorista do projeto candidato a recebê-la se encontra;
- Respeito às leis trabalhistas: jornada máxima diária de 8 horas, com um acréscimo de no máximo 2 horas extras, sendo permitido semanalmente no máximo 44 horas de trabalho; 30 minutos de intervalo a cada 4 horas trabalhadas; 1 hora de intervalo a cada 8 horas trabalhadas; 11 horas de intervalo entre o fim de uma jornada e o início da próxima;
- O tempo ocioso gerado com a tarefa realocada deve ser menor do que com ela no seu projeto de origem.

## 3.3 SOLUÇÃO INICIAL E REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

Considerou-se como solução inicial a escala empregada atualmente pela empresa, ou seja, os projetos de escalas.

Para facilitar o entendimento do método aplicado, uma escala será representada como na figura 10, em que XXXX representa o código de identificação da escala,  $Hi_i$  é o horário inicial e  $Hf_i$  o horário final da tarefa  $i$ . A linha contínua entre as tarefas representa a ociosidade entre elas.

Figura 10: Representação de uma escala



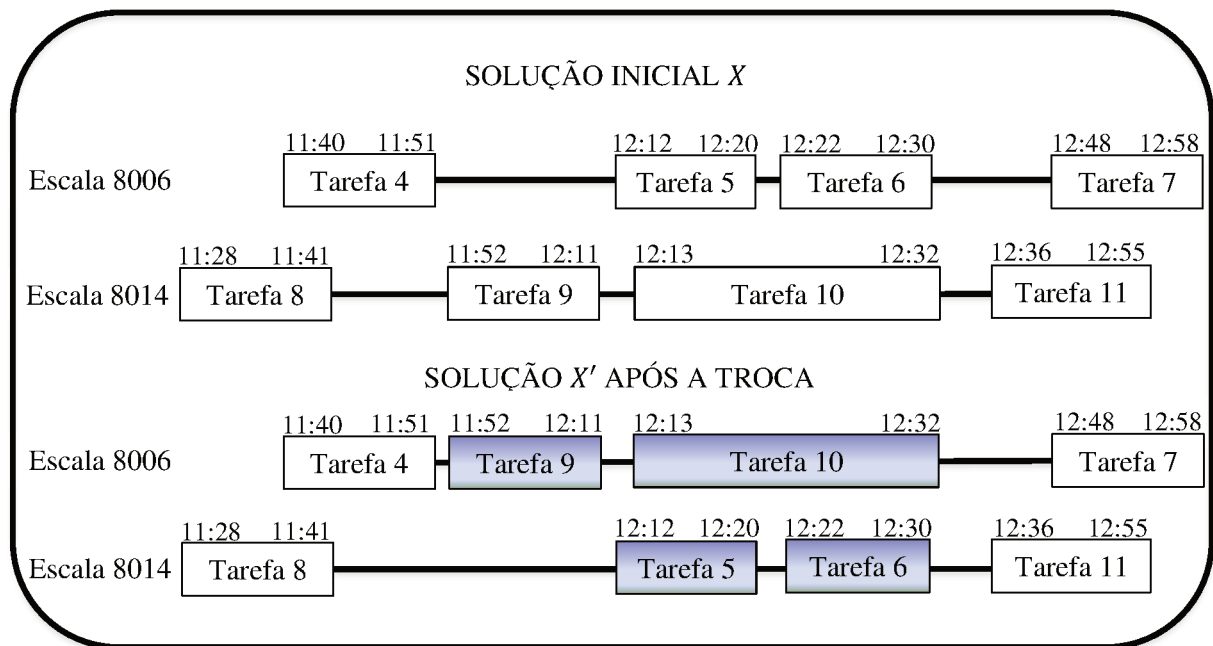
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4 DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE VIZINHANÇA

Considerou-se três estruturas de vizinhança definidas a seguir.

#### 3.4.1 Vizinhança $N_1$

Figura 11: Operação de troca



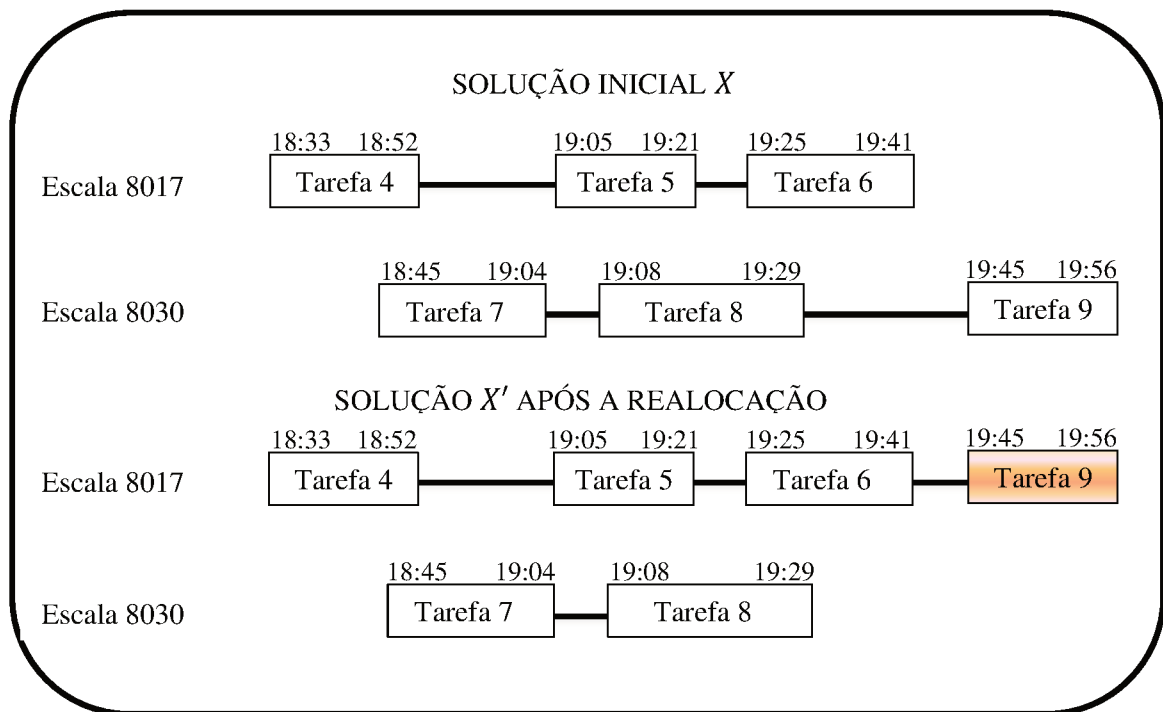
Fonte: Elaborado pelo autor

Dada a solução de escala  $X$ , uma solução  $X'$  é dita pertencer à vizinhança  $N_1$  se  $X'$  é melhorada partir de  $X$  realizando-se trocas de tarefas entre escalas, como representado na figura 11.

### 3.4.2 Vizinhança $N_2$

Uma solução  $X'$  pertence à vizinhança  $N_2$  se  $X'$  é obtida a partir de  $X$  realizando-se realocações de tarefas entre escalas, como representado na figura 12.

Figura 12: Operação de realocação

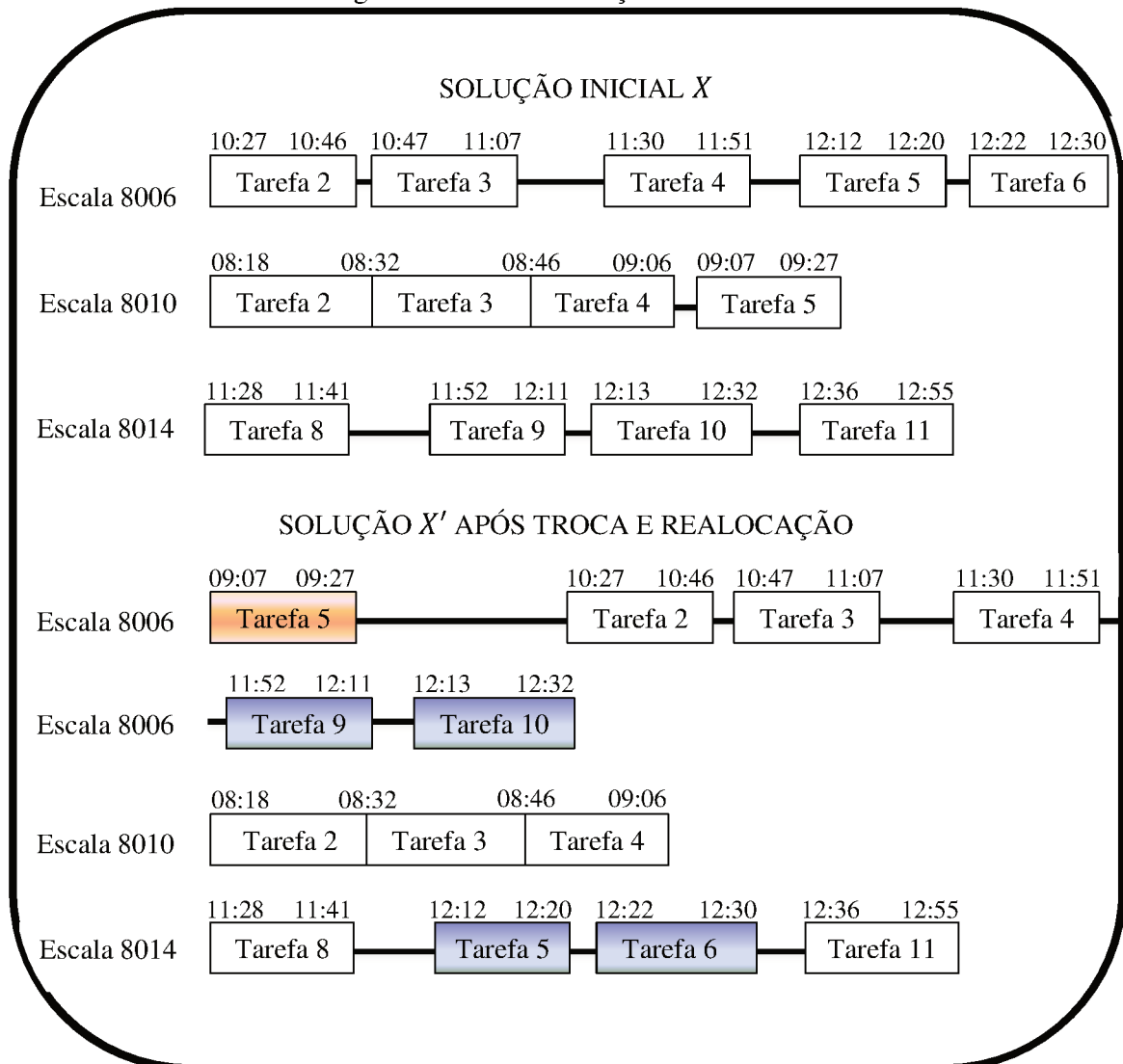


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4.3 Vizinhança $N_3$

Da mesma forma, a solução  $X'$  pertence à vizinhança  $N_3$  se  $X'$  é obtida a partir de  $X$  realizando-se trocas e realocações de tarefas entre escalas, como representado na figura 13.

Figura 13: Troca e relocação entre tarefas



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Os experimentos foram realizados em um computador com processador Intel® Core™ i5-3210M, 4 GB de RAM e Sistema Operacional Windows 7 64 Bits. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem C++ através da ferramenta CodeBlocks.

Para a busca de descida nas três estruturas de vizinhança, foram desenvolvidas as rotinas RN1, RN2 e RN3, as quais realizam combinações dos movimentos definidos nas figuras 11, 12 e 13.

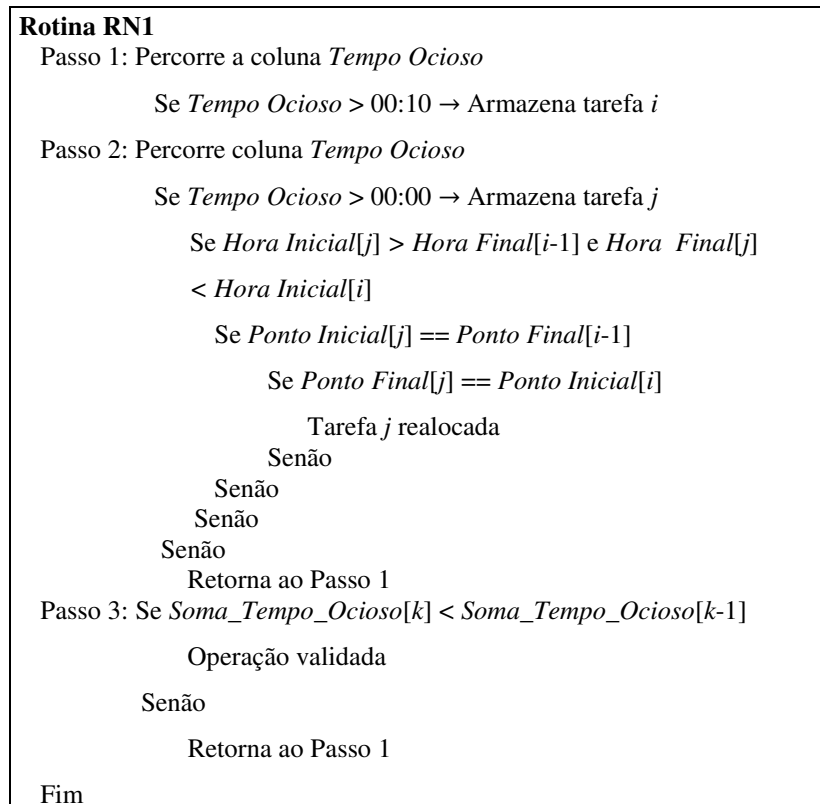
A rotina RN1 executa trocas de acordo com os tempos ociosos entre tarefas dos motoristas. A RN2 executa realocações de acordo com o tempo de intervalo excedente sobre o

determinado pela lei e a RN3 troca e realoca tarefas de acordo com o espaço de tempo a ser preenchido até o limite de horas diárias trabalhadas determinado em lei.

A lógica utilizada para a busca local nas rotinas é detalhada a seguir.

**Rotina RN1** - Considerando  $i$  a tarefa candidata a receber um vizinho,  $j$  a tarefa candidata a passar por uma troca na  $k$ -ésima iteração, realiza-se os passos na figura 14.

Figura 14: Rotina RN1



Fonte: Elaborado pelo autor

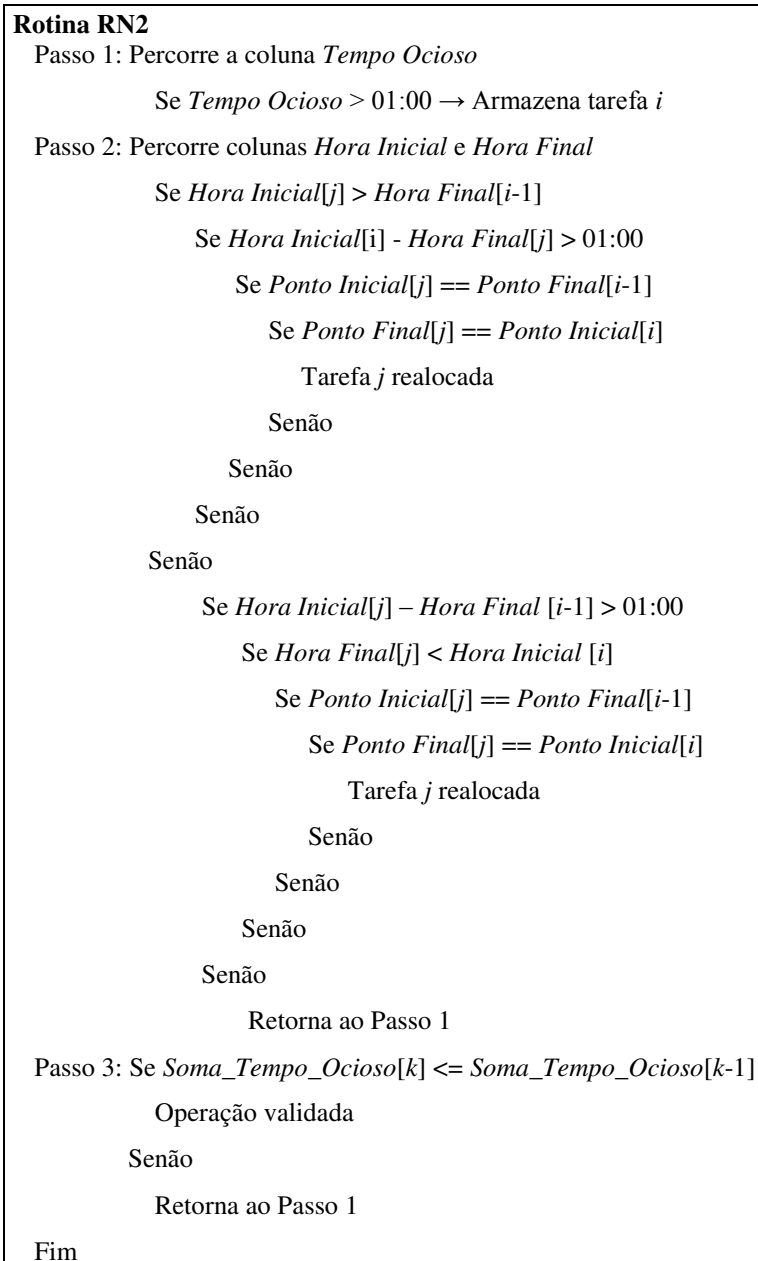
Em RN1 nunca se altera o tempo total da jornada do motorista candidato a receber uma nova tarefa, porém esse tempo pode se alterar se a jornada receber a primeira ou a última tarefa de um projeto. No entanto, esse tempo pode ser compensado em RN3, que realoca tarefas no intervalo do tempo máximo de jornada diária.

No Passo 1 foi considerado 00:10 como tempo ocioso mínimo pois segundo a empresa esse é o menor tempo de ida e volta de uma tarefa, e assim, o motorista candidato não compromete o cumprimento da sua próxima tarefa, caso assuma outra.

**Rotina RN2** - Considerando  $i$  a tarefa candidata a receber um vizinho,  $j$  a tarefa candidata a passar por uma realocação na  $k$ -ésima iteração, realiza-se os passos na figura 15.

Diferentemente da rotina RN1, na rotina RN2 a comparação da *Soma\_Tempo\_Ocioso* com a iteração anterior pode ser menor ou igual, pois sendo igual ainda assim pode-se deixar um espaço livre no projeto da tarefa que foi alocada a ser preenchido por eventuais operações que surgirem à frente, eliminando o tempo excedente de intervalo do projeto em questão.

Figura 15: Rotina RN2



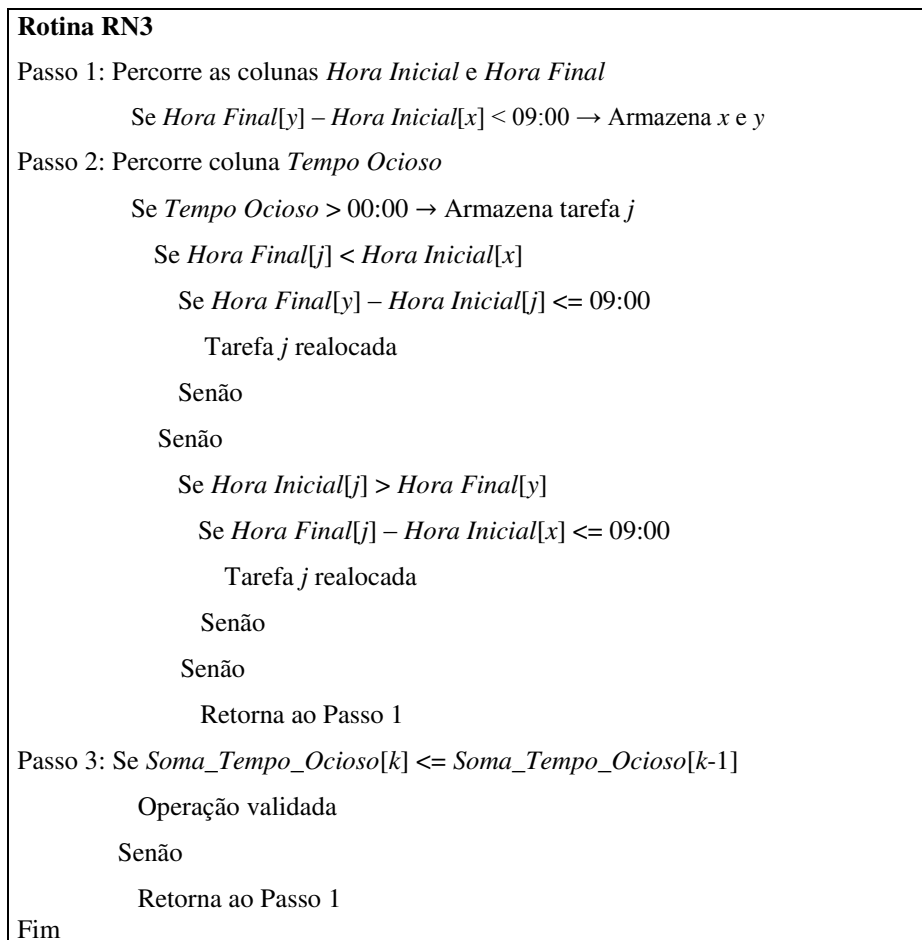
Fonte: Elaborado pelo autor



**Rotina RN3** - Seja  $i$  a tarefa candidata a receber um vizinho,  $j$  a tarefa candidata a passar por uma troca/relocação na  $k$ -ésima iteração. Considerando um projeto cuja primeira tarefa é  $x$  e a última tarefa é  $y$ , realizam-se os passos na figura 16.

Foi considerado um tempo máximo de 09:00 horas para o Projeto Escala devido ao fato de 08:00 horas serem determinadas pela legislação, mais 01:00 hora extra. Mesmo a legislação permitindo 02:00 horas extras, foi considerado apenas 01:00 hora, pois está dentro do que é praticado pela empresa e é razoável num eventual cálculo dentro do horizonte semanal.

Figura 16: Rotina RN3



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O tempo ocioso total de todos os 27 projetos antes da aplicação do método era de 53 horas e 45 minutos no planejamento diário de escala. Após a execução do método heurístico,

o tempo ocioso foi reduzido para 32 horas e 40 minutos. Entretanto, três projetos foram modificados a ponto de reduzir o dia de trabalho do motorista para apenas meia jornada (4 horas de trabalho), alterando assim o seu tempo de intervalo para 30 minutos. Outro projeto foi alterado deixando o motorista com apenas duas tarefas e duração total de trabalho de 1 hora e 31 minutos. Para esse caso específico, não foi considerado tempo de intervalo. Caso fosse possível realocar essas duas tarefas a outro(s) motorista(s), um motorista seria eliminado do quadro de escalas, gerando redução de custos para a empresa. Portanto, considerando a alteração em relação o tempo de intervalo total, que de 27 horas passou para 24 horas e 30 minutos, tem-se um novo tempo ocioso de 35 horas e 10 minutos.

Figura 17: Solução inicial - Projeto 0650-4

Projeto	Motorista	Veículo	Escala	Tarefa	Hora Saída	Hora Chegada	Tempo Ocioso	Ponto Inicial	Ponto Final	Linha Inicial	Linha Final
0650-4	9847	11301	8010	1	06:52	07:13	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	2	07:15	07:33	00:02	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	3	07:35	07:56	00:02	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	4	07:57	08:15	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	5	08:18	08:32	00:03	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	6	08:32	08:46	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	7	08:46	09:06	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	8	09:07	09:27	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	9	11:30	11:43	02:03	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	10	11:43	11:56	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	11	12:08	12:27	00:12	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	12	12:28	12:48	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	13	12:50	13:09	00:02	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	14	13:12	13:31	00:03	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	15	13:40	13:53	00:09	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	16	13:53	14:06	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	17	14:07	14:29	00:01	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	18	14:36	14:58	00:07	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando a soma do tempo ocioso de todos os motoristas da solução real com o obtido pelo método, houve redução de 34,57%, respeitando todas as normas trabalhistas e seguindo as práticas da empresa. O exemplo presente nas figuras 17 e 18 representa uma amostra de melhoria entre solução inicial e solução obtida.

A figura 17 mostra o projeto 0650-4 antes de sofrer alterações, com um tempo ocioso total de 2 horas e 47 minutos.

Figura 18: Solução obtida - Projeto 0650-4

Projeto	Motorista	Veículo	Escala	Tarefa	Hora Saída	Hora Chegada	Tempo Ocioso	Ponto Inicial	Ponto Final	Linha Inicial	Linha Final
0650-4	9847	11301	8010	1	06:52	07:13	00:00	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	2	07:15	07:33	00:02	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	3	07:35	07:56	00:02	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	4	07:57	08:15	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	5	08:18	08:32	00:03	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	6	08:32	08:46	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11103	8013	3	09:50	10:08	01:04	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11103	8013	4	10:09	10:27	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11324	8004	9	10:27	10:41	00:00	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11324	8004	10	10:41	10:55	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11329	8002	12	11:00	11:13	00:05	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11329	8002	10	11:13	11:27	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	9	11:30	11:43	00:03	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	10	11:43	11:56	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	11	12:08	12:27	00:12	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	12	12:28	12:48	00:01	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	13	12:50	13:09	00:02	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	14	13:12	13:31	00:03	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650
	9847	11301	8010	15	13:40	13:53	00:09	Estação N. Brasília	Morro do Meio	1505	1505
	9847	11301	8010	16	13:53	14:06	00:00	Morro do Meio	Estação N. Brasília	1505	1505
	9847	11301	8010	17	14:07	14:29	00:01	Estação N. Brasília	Terminal Central	0650	0650
	9847	11301	8010	18	14:36	14:58	00:07	Terminal Central	Estação N. Brasília	0650	0650

Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 18 o projeto já possui as alterações obtidas pelo método. Observa-se uma queda do tempo ocioso total para 1 hora e 56 minutos com a adição de mais tarefas, gerando uma redução de 43,97% do tempo ocioso total em relação à solução real do projeto.

Nota-se que nas colunas “Veículos”, “Escalas” e “Tarefas” estão presentes os dados oriundos dos projetos anteriores, que agora compõem o atual, sob responsabilidade do motorista 9847.

Ressalta-se que neste novo projeto, o motorista deveria trocar de veículo. Para que não ocorresse esse tipo de troca, os projetos dos veículos deveriam ser refeitos, já de forma otimizada.

Esse mesmo processo foi recorrente em 23 projetos, gerando melhorias que ocasionaram bons resultados. Outros 4 projetos, por não poderem ser melhorados, não foram modificados.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que o custo operacional representado pelas escalas de trabalho compõe parte significativa dos custos totais de uma empresa de transporte público, o Problema de Programação de Tripulações ganha uma importância muito maior no planejamento operacional do Sistema de Transporte Público. A otimização das escalas de trabalho afeta tanto as empresas operadoras quanto os usuários, pois com determinada economia gera-se a possibilidade de um maior investimento na qualidade do transporte público e de redução do valor das tarifas.

Essa problemática motivou o presente estudo, no qual o objetivo foi apresentar um método de solução para o mesmo. Foram investigadas diversas técnicas disponíveis na literatura e trabalhos relacionados que poderiam efetivamente contribuir na resolução do problema e optou-se pela meta heurística VNS. O método proposto foi desenvolvido para resolver um caso real. Durante o desenvolvimento do estudo, foi possível entender as características do problema e desenvolver uma metodologia que determinasse soluções que atendessem as exigências da empresa e as normas trabalhistas e reduzissem os custos de operação. Os testes aplicados ao sistema computacional desenvolvido apresentaram resultados satisfatórios, mostrando o poder que a combinação de três rotinas pode causar em problemas reais de planejamento.

Além disso, as soluções obtidas pelo método foram comparadas com as soluções utilizadas pela empresa que embora apresente bons resultados para problemas reais, é passível de erros, uma vez que ainda é feita de forma totalmente manual.

A meta heurística proposta mostrou-se eficiente, pois partindo de uma solução real foi possível obter uma solução final melhor em um percentual de 34,57%.

Portanto, os resultados obtidos para este modelo validam a utilização da meta heurística VNS para a resolução do problema de escalas de motoristas de transporte público urbano.

Sendo a etapa final do planejamento de um sistema de transporte público, o PPT pode impactar significativamente na qualidade do serviço do transporte público urbano e no preço final da tarifa para o usuário.

Dessa forma, este trabalho contribui no sentido de oferecer ferramentas que podem ser utilizadas na elaboração e utilização de técnicas organizacionais de planejamento cujo impacto financeiro que uma eventual implantação das novas escalas geraria consequências impactantes aos usuários. Uma vez que o custo para a empresa é reduzido, junto a um acordo com o governo o valor da tarifa pode se reajustar na mesma proporção, fazendo com que o uso do transporte público seja mais acessível à população.

Outra opção seria alocar a economia gerada ao investimento em qualidade do serviço. Assim, as pessoas se motivariam a utilizar mais o transporte público, abrindo mão do uso de seus veículos particulares que muitas vezes são os causadores dos pontos de gargalo no tráfego das cidades, pois teriam um serviço mais confiável, seguro e confortável, o que seria muito positivo em termos de sustentabilidade e preservação ambiental.

#### 4.1 DIFICULDADES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais dificuldades se referem à etapa computacional, devido ao grande número de restrições e iterações ao longo da implementação. Devido ao volume de dados, a etapa de transcrição para as planilhas foi bastante trabalhosa. O fato de ter gerado projetos com jornadas com tempos distintos em relação ao praticado pela empresa poderia gerar certo entrave numa situação de implantação real.

Entre as propostas para continuidade do presente trabalho, pode-se sugerir:

- A expansão da programação para os demais terminais da cidade de Joinville;
- Se houver, incluir a escala de cobradores na implementação, tendo em vista que eles fazem parte da tripulação;
- Fazer um levantamento financeiro detalhado a fim de calcular a dimensão do impacto perante aos poderes público e privado, além da sociedade;
- A integração da escala de tripulantes com a escala de veículos, pois nem sempre os veículos disponíveis estão aptos a realizar as viagens. Então, torna-se necessário que

a oficina de manutenção saiba com antecedência quais veículos têm prioridade na manutenção em função das viagens programadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, R. K.; ORLIN, J. B.; SHARMA, D. Very Large Scale Neighborhood Search. **Operations Research**. Cambridge, v.7, p. 301-317, 2000.
- ANDRADE, J. P. **Planejamento dos Transportes**. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 1994.
- ANDRADE, S. D. G. **Metaheurísticas Busca Tabu Para o Problema de Rodízio de Tripulações de Ônibus Urbanos**. Ouro Preto: UFOP, 2013.
- AZEVEDO FILHO, M. A. N.; KWAN, R. S. K.; WREN, A. A Alocação de Ônibus e Motoristas no Brasil: Alguma Experiência Prática. **Anais do VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. v. 2, p. 231-242. Recife: ANPET, 1994.
- BALL, M.; BODIN, L.; DIAL, R. Experimentation with a computerized system for scheduling mass transit vehicles and crews. **Computer Scheduling of Public Transport, Urban Passenger Vehicle and Crew Scheduling**. Amsterdam, p. 313-334. 1981.
- BARNHART, C. et al. Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs. **Operations Research**. Atlanta, v. 46, p. 316-329. 1998.
- BATISTA JR., E. D.; SENNE, E. L. F. **Uma metodologia para a avaliação do desempenho de sistemas de transporte coletivo urbano**. Guaratinguetá: UNESP, 1999.
- BEASLEY, J. E. An algorithm for set covering problem. **European Journal of Operational Research**. Londres, v. 31(1), p. 85-93. 1987.
- BLAIS, J. Y.; LLAPORTE, G.; LESSARD, R.; ROUSSEAU, J. M.; SOUMIS, F. The problem of assigning drivers to bus routes in a urban transit system, Report n. 44, **Centre de recherche sur les Transports**. Montreal: Université de Montréal, 1976.
- BOUZADA, C. F. **Custo do transporte coletivo por ônibus**. Belo Horizonte: C/Arte, 2003.
- BRUTON, M. J. **Introdução ao planejamento dos transportes**. São Paulo: USP, 1979.
- CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P.; VIGO, D.; GUIDA, P. L. Algorithms for railway crew management. **Mathematical programming**. Bologna, v. 79, p. 125-141. 1997.
- CARDOSO, A. **Fundamentos da Pesquisa Operacional**. Alfenas: Universidade Federal de Alfenas, 2011.
- CLICKRBS. **Tarifa embarcada de ônibus em Joinville é a mais cara do país**. Joinville, 2016. Disponível em: <<http://anoticia.clicrbs.com.br/sc/geral/joinville/noticia/2016/01/tarifa-embarcada-de-onibus-em-joinville-e-a-mais-cara-do-pais-4944720.html>>. Acesso em: 10 jun. 2016.



COLIN, H. A. Evaluation of Public Transit Services: The Leve-of-service Concept. **Transportation Research**. Washington, p. 37-40. 1976.

CUNHA, C. B. O Problema de Escala de Pessoal Operacional no Transporte Coletivo Urbano por Ônibus. **Anais do VI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. p. 609-622. Rio de Janeiro: ANPET, 1992.

CUNHA, C. B. **Uso da técnica de busca em vizinhança de grande porte para a programação de escala de motoristas de ônibus urbano**. Ouro Preto: UFOP, 2010.

DATAPOA. **Composição tarifária**. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://datapoa.com.br/dataset/onibus-composicao-tarifaria>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

DESROCHERS, M.; SOUMIS, F. **A Column Generation approach to the urban transit crew scheduling problem**. Montreal: École des Hautes Études commerciales, 1989.

DFTRANS. **Procedimentos para o cálculo tarifário**. Distrito Federal, 2009. Disponível em: <<http://www.dftrans.df.gov.br/images/PDFs/calculo%20tarifario.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2016.

EHRLICH, P. J. **Pesquisa Operacional: Curso Introductório**. São Paulo: Atlas, 1982.

ERNST, A. T.; JIANG, H.; KRISHNAMOORTHY, M.; SIER, D. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. **European Journal of Operational Research**. Melbourne, v. 153, p. 3-27. 2004

FISCHETTI, M.; MARTELLO, S.; TOTH, P. The fixed job schedule problem with spread-time constraints. **Operations Research**. Pádua, v. 35, n. 6, p. 849–858. 1987.

FISCHETTI, M. et al. A polyhedral approach to simplified crew scheduling and vehicle scheduling problems. **Management Science**. Pádua, v. 6, n. 47, p. 833-850. 2001.

FISHER, M. L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems, **Management Science**. Philadelphia, v. 27, p. 1-18. 1981.

FORES, S.; PROLL, L.; WREN, A. An improved ILP system for driver scheduling. In: Wilson, N. H. M. (Ed.) **Computer-Aided Transit Scheduling**. p. 43–61. Montreal: Springer, 1999.

FRELING, R.; LENTINK, R. M; WAGELMANS, A. P. A decision support system for crew planning in passenger transportation using a exible branch-and-price algorithm. **Annals of Operations Research**. v. 127, p. 203-222. Rotterdam: Springer, 2004.

FRIBERG, C.; HAASE, K. An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem. In: Wilson, N. H. M. (Ed.) **Computer-Aided Transit Scheduling**. p. 63–80. Montreal: Springer, 1999.

GAMACHE, M.; SOUMIS, F.; MARQUIS, G.; DESROSIERS, J. A column generation approach for large-scale aircrew rostering problems. **Operations Research**. Montreal, v. 47, n.2, p. 247-263. 1999.

GIDION. **Gidion Transporte e Turismo Ltda.** Joinville, 2016. Disponível em: <<http://www.gidion.com.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

GONÇALVES, T. L. **Metaheurísticas para o problema de programação de tripulações.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.

GOUVEIA, F. H. C. A Importância da Formulação do Problema Na Pesquisa Operacional em Face do Processo Decisorial. In: 2º Congresso USP de Iniciação Científica em Contabilidade. **2º Congresso USP de Iniciação Científica em Contabilidade.** São Paulo, 2005.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. An introduction to variable neighborhood search for the p-median. In: VOSS, S. et al. (Ed.). **Metaheuristics Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization.** Dordrecht: Kluwer, p. 433-458. 1999.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Developments of variable neighborhood search. **Les Cahiers du GERAD**, Montreal, v. 22, n. G-01-24, 2001.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Industrial applications of the variable neighborhood search metaheuristics. In: ZACCOUR, G. (Ed.). **Decisions and Control in Management Science.** Boston: Kluwer, p. 261-274. 2001.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. J-means: A new local search heuristic for minimum sum-of-squares clustering. **Pattern Recognition**, New York, v. 2, n. 34, p. 405–413, 2001.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search: Principles and applications. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, n. 130, p. 449–467, 2001.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N.; PEREZ, J. A. M. Variable neighborhood decomposition search. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 4, n. 7, p. 335–350, 2001.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search. In: PARDALOS, M. P.; RESENDE, M. G. C. (Ed.) **Handbook of Applied Optimization.** Boston: Kluwer, 2002.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. A tutorial on variable neighborhood search. **Les Cahiers du GERAD**, Montreal, v. 2003-46, n. G, 2003.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. (Ed.). **Handbook of Metaheuristics.** Dordrecht: Kluwer, p. 145-184. 2003.

LESSARD, R.; ROSSEAU, J. M.; DUPUIS, D. **Hastus I: A mathematical programming approach to the bus driver scheduling problem.** Amsterdam: Elsevier, 1981.

LI, J.; KWAN, R. S. K. A fuzzy genetic algorithm for driver scheduling. **European Journal of Operational Research**. Leeds, v. 147, n. 2, p. 334–344. 2003.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An Effective Heuristic Algorithm for the Travelling-Salesman Problem. **Operations Research**. Nova Jersey, v. 21, n. 1, p. 498–516. 1973.

LOURENÇO, H. R.; PAIXÃO, J. M. P.; PORTUGAL, R. Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem. **Transportation Science**. Barcelona, v. 35, n. 3, p. 331–343. 2001.

MANINGTON, B.; WREN, A. **A general computer method for bus crew scheduling**. Chicago: Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle operators for Urban Public Transportation Services, 1975.

MARINHO, E. H. et al. Busca Tabu aplicada ao problema de programação de tripulações de ônibus urbano. In: XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO. **Anais...** p. 1471–1482, São João Del-Rei: Sobrapo, 2004.

MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. A new hybrid heuristic for driver scheduling. **International Journal of Hybrid Intelligent Systems**. Amsterdam, v. 4, p. 39-47. 2007.

MAURI, G. R.; SOUZA, M. **Resolução do problema de programação de tripulações de um sistema de transporte público via Simulated Annealing**. Ouro Preto: UFOP, 2003

METZ, E. M. **Aplicação da Metaheurística Busca em Vizinhança Variável no Fretamento de Ônibus Intermunicipais**. Santa Cruz do Sul: UNISC, 2011.

MLADENOVIC, N. A variable neighborhood algorithm - a new metaheuristic for combinatorial optimization. **Abstracts of Papers Presented at Optimization Days**, 12, Montreal, 1995.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers and Operations Research**. Belgrado, v. 24, p. 1097–1100. 1997.

MOURA, A. V.; YUNES, T. H.; SOUZA, C. C. A hybrid approach for solving large scale crew scheduling problems with constraint programming and integer programming. **Second Workshop on Practical Aspects of Declarative Languages**. Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2000.

PIRES, A. B.; VASCONCELOS, E. A.; SILVA, A. C. **Transporte Humano - Cidades com Qualidade de Vida**. São Paulo: ANTP, 1997.

RECK, G. **Apostila Transporte Público**. Curitiba: UFPR, 2011.

REIS, J. A. **Heurísticas baseadas em busca em vizinhança variável para o problema de programação integrada de veículos e tripulações no transporte coletivo urbano por ônibus**. São Paulo: Escola Politécnica USP, 2008.

REIS, A. F. da S.; SILVA, G. P. Um estudo de diferentes métodos de busca e a meta heurística VNS para otimizar a escala de motoristas de ônibus urbano. In: Transporte em Transformação XVI – Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT – Produção Acadêmica 2011. Transporte em Transformação XVI. **Anais...** p. 47–64. Ouro Preto: Positiva, 2012.

REIS, J. A.; CUNHA, C. B.; SILVA, G. P. Uma Abordagem Integrada para o Problema de Programação de Veículos e Tripulantes de Ônibus. In: XXI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais do XXI ANPET**. p. 1-12. Rio de Janeiro: ANPET, 2007.

REIS, J. A.; SILVA, G. P.; SOUZA, M. J. F. Otimização integrada no sistema de transporte público. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XX. **Anais do XX ANPET**. p. 717-728, Brasília: ANPET, 2006.

ROSSEAU, J.; LESSARD, R.; BLAIS, J. Y. **Enhancement to the Hastus crew scheduling algorithm**. Amsterdam: Elsevier, 1985.

SACOMANO NETO, M.; TRUZZI, O. M. S. **Configurações estruturais e relacionais da rede de fornecedores: uma resenha abrangente**. Revista de Administração – RAUSP, v. 39, n. 3, p. 244-263, 2004.

SANTOS, A. G.; MATEUS, G. R. Crew scheduling urban problem: an exact column generation approach improved by a genetic algorithm. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**. p. 1725-1731. Cingapura: IEEE, 2007.

SEGISMUNDO, A. **Planejamento de Transporte Público Urbano com Sistema de Informações Geográficas**. Guaratinguetá: UNESP, 2000.

SHEN, Y.; KWAN, R. S. K. Tabu search for driver scheduling. In: S. Voss e J. R. Daduna (Ed.), **Computer-Aided Scheduling of Public Transport**. Montreal: Springer, 2001. p. 121–135.

SILVA, G. P. **Uma metodologia baseada na técnica de geração de arcos para o problema de programação de veículos**. São Paulo: Escola Politécnica USP, 2001.

SILVA, G. P.; CUNHA, C. B. Uso da Técnica de Busca em Vizinhança de Grande Porte para a Programação da Escala de Motoristas de Ônibus Urbano. **Transportes**. Ouro Preto, v. 18, p. 64–75. 2010.

SILVA, G. P.; GUALDA, N. D. F. O Método Arcgen para Programação de Veículos: Um Estudo de Caso da Cidade de Belo Horizonte. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes XV. **Anais: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes**. v. 1, p. 129-137. Campinas: ANPET, 2001.

SILVA, G. P.; GUALDA, N. D. F. Um Algoritmo de Geração de Arcos para o Problema de Programação de Veículos. **Transportes**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 35-55. 2000.

SILVA, G. P.; REIS, A. F. da S. A study of different metaheuristics to solve the urban transit crew scheduling problem. **Journal of Transport Literature**. Ouro Preto, v. 8, n. 4, p. 227–251. 2014.

SILVA, G. P.; SOUZA, M. J. F.; ATZINGEN, J. Um método híbrido de geração de colunas para otimizar a mão de obra do sistema de transporte público. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, XXXVI, 2004, São João Del Rei. **Anais do XXXVI SBPO**. São João Del Rei, SOBPAPO, p.1989-1995. 2004.

SIQUEIRA, P. H. **Aplicação do Algoritmo do Matching no Problema da Construção de Escalas de Motoristas e Cobradores de Ônibus**. Curitiba: UFPR, 1999.

SMITH, B. M.; WREN, A. A bus crew scheduling system using a set covering formulation. **Transportation Research**. Amsterdam, v. 22A, p. 97-108. 1988.

STEFANELLO, F. **Hibridização de métodos exatos e heurísticos para resolução de problemas de otimização combinatória**. Santa Maria: UFSM, 2011.

VASCONCELOS, E. A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento – reflexões e propostas**. São Paulo: Unidas, 1996.

WILHELM, E. B. **Overview of the Rucus package driver run cutting program**. Chicago: RUNS, 1975.

WREN, A. Scheduling Vehicles and Their Drivers – Forty Years Experience. In: 9<sup>th</sup> International Conference. **Computer-Aided Scheduling of Public Transport**. p. 27-40, San Diego: CASPT, 2004.

WREN, A.; SMITH, B. M.; MILLER, A. J. **Complementary approaches to crew scheduling**, Amsterdam: Elsevier Science, 1985.

YUNES, T.H.; MOURA, A. V.; SOUZA, C.C. Hybrid Column Generation Approaches for Urban Transit Crew Management Problems. **Transportation Science**. Campinas, v. 39(2), p. 273-288. 2005.